



Sérgio Alexandre
Pereira Cruz

Desenvolvimento de um sistema para
planeamento e controlo da produção



**Sérgio Alexandre
Pereira Cruz**

**Desenvolvimento de um sistema para
planeamento e controlo da produção**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de José Paulo Oliveira Santos, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e de Ana Maria Pinto de Moura, Professora Auxiliar do Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial da Universidade de Aveiro.

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor António Gil D'Orey de Andrade Campos

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Prof. Doutor Bernardo Sobrinho Simões de Almada Lobo

Professor Associado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof. Doutor José Paulo Oliveira Santos

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro (orientador)

Agradecimentos / Acknowledgements

Agradeço ao meu orientador, José Paulo Santos e à minha co-orientadora, Ana Pinto Moura, toda a orientação e apoio no decurso deste trabalho. Agradeço também ao Engenheiro Hugo Ferreira a disponibilidade prestada ao longo de todo o trabalho, a sua participação foi essencial para a obtenção de informação e esclarecimentos importantes sobre o funcionamento da empresa.

Por último, e não menos importante, agradeço aos meus amigos, colegas de curso e, em especial, à minha família por todo o apoio e compreensão ao longo deste trabalho.

Palavras-chave

Planeamento da produção; Gestão e controlo de operações; Algoritmos e Meta-heurísticas

Resumo

Atualmente o sector industrial está inserido num mercado cada vez mais competitivo, onde é exigida uma estratégia empresarial que possa garantir a sua permanência e destaque no atual mercado.

Por esta razão, um planeamento e controlo da produção adequado torna-se essencial para o bom funcionamento de uma empresa. Através destes sistemas é possível atuar de forma positiva na produção, rentabilizando-se o sector produtivo da empresa que contribui para o aumento da qualidade de serviço e também para o crescimento económico da empresa. Com um planeamento da produção adequado, uma organização dispondo das mesmas capacidades, é capaz de produzir quantidades iguais num menor intervalo de tempo. Por outro lado, um controlo da produção preciso é imprescindível para o fornecimento da informação correta quando necessária.

No sentido de otimização, uma empresa apresentou algumas sugestões de melhoria a nível do planeamento e controlo da produção. Este trabalho surge assim com o intuito de dar resposta às propostas apresentadas. Para tal, no desenvolvimento desta dissertação, criou-se uma ferramenta dotada de dois algoritmos e um sistema de controlo para aquisição de informação de forma automatizada.

Em suma, o sistema proposto apresenta a capacidade de construção de boas soluções para o planeamento, conciliada com um sistema de aquisição de dados bastante prático e eficaz. Mantendo sempre a flexibilidade necessária para um sistema deste género.

Keywords

Production planning; Management and control of operations; Algorithms and Meta-heuristics

Abstract

Nowadays the industrial sector is inserted in an increasingly competitive market, where it is necessary to have a business strategy that can guarantee their permanence and relevance in the current market.

For this reason, a suitable production planning and control is essential for the proper functioning of a company. These systems can act positively in the production, maximizing the way the productive sector of the company contributes to increased quality of service and to the company's economic growth. With a proper planning of production, one organization with such capabilities is capable of producing the same products in a shorter time. On the other hand, a precise control of the production is essential to provide the correct information when needed.

In order to optimize, the company presented some suggestions of improvement in the production planning and control. This work emerges as response to these suggestions. This way, during the development of this thesis, a tool containing two algorithms and a control system for acquisition of information in an automated way, was created.

In short, the proposed system presents the capability to develop good planning solutions, conciliated with a very practical and effective, data acquisition system, while maintaining the necessary flexibility.

Conteúdo

Lista de Tabelas	iii
Lista de Figuras	v
Acrónimos	vii
1 Introdução	1
1.1 Contexto	1
1.2 Problema	1
1.3 Resultados esperados	2
1.4 Organização da dissertação	2
2 A Empresa	5
2.1 Análise dos produtos	6
2.2 Análise da faturação	7
2.3 Análise da produção	9
3 Revisão do Estado da Arte	15
3.1 Conceitos	15
3.2 Soluções académicas propostas por outros	18
3.2.1 Projeto de desenvolvimento de um sistema de planeamento de produção na Pecol 2	18
3.2.2 Desenho de uma nova ferramenta de planeamento da produção de transformadores Core na EFACEC Energia	19
3.2.3 Planeamento e controlo de produção na Euronete, S.A.	20
3.2.4 Análise e projeto de um sistema de apoio ao planeamento de encomendas na Coindu, S.A.	22
3.3 Soluções comerciais atuais	23
3.4 Algoritmos	24
3.4.1 Algoritmos no planeamento da produção	26
4 Proposta e implementação da solução	29
4.1 Proposta de uma nova solução	29
4.2 A Ferramenta	31
4.3 Aquisição de dados	35
4.4 Base de dados	37
4.5 Algoritmos para planeamento	38

4.5.1	Algoritmo Genético	38
4.5.2	Algoritmo <i>Branch-and-Bound</i>	43
5	Análise de resultados	47
5.1	Algoritmo Genético	47
5.2	Algoritmo <i>Branch-and-Bound</i>	53
5.3	Comparação com o planeamento existente	54
6	Conclusões e trabalho futuro	59
	Bibliografia	61
	Anexos	64
A	Árvore de Produto fechadura 7715	67
B	Ferramenta	69
C	Base de dados	71

Lista de Tabelas

3.1	Avaliação das soluções propostas [40]	18
3.2	Analogia entre problemas de otimização e termodinâmicos [7]	26
3.3	Percentagens de artigos analisados em [41] de acordo com o número de estágios e o tipo de máquinas	27
3.4	Funções objetivo e alguns exemplos de literatura	28
4.1	Correspondências utilizadas na programação do PLC	36
4.2	Exemplo do funcionamento da seleção	43
5.1	Tempos de cálculo do AG com 20 tarefas	52
5.2	Tempos de cálculo do AG com 100 tarefas	52
5.3	Tempos de conclusão obtidos com o algoritmo B&B	53
5.4	Tempos de processamento obtidos com o algoritmo B&B e enumeração completa	54
5.5	Lista de tarefas com prioridades atribuídas pela empresa	55
5.6	Lista de encomendas e prioridades dadas pela empresa	56
5.7	Resultados obtidos para o planeamento das encomendas dado pela empresa	57
5.8	Resultados obtidos para o planeamento das encomendas dado pela ferramenta	58
C.1	Tabela “jobs” da base de dados	71
C.2	Tabela “BOM” da base de dados	72

Lista de Figuras

2.1	Instalação fabril da GNS	5
2.2	Tipo de fechaduras [13]	6
2.3	Janela oscilobatente [32]	7
2.4	Alguns exemplos de acessórios [12]	7
2.5	Análise faturação	8
2.6	Percentagens de faturação dos produtos	9
2.7	Esquema do layout fabril	9
2.8	Armazém matéria-prima	10
2.9	Máquinas de corte	11
2.10	Máquinas de cravação	11
2.11	Postos de montagem	12
2.12	Esquema simplificado do fluxo dos materiais em análise	13
3.1	Estrutura de um sistema PCP [45]	15
3.2	Sistema lógico proposto [33]	20
3.3	Sistema lógico proposto [18]	21
3.4	Sequência temporal do planeamento de produção na Coindu [11]	22
3.5	Esquema dos tipos de algoritmos de otimização	25
4.1	Diagrama de interações solução proposta	30
4.2	Ficheiro Excel com lista de encomendas	30
4.3	Janela inicial da ferramenta	31
4.4	Janela relativa à montagem	33
4.5	Janela relativa à produção	34
4.6	Sistema de aquisição de dados proposto	35
4.7	Esquema tipo para contagem de peças à saída das máquinas [44]	36
4.8	Esquema relações BD	37
4.9	Fluxograma deslocações de materiais nos balancés	39
4.10	Exemplo de matriz de dados iniciais do AG	40
4.11	Fluxograma do algoritmo genético utilizado	41
4.12	Estrutura de dados utilizado no algoritmo genético	42
4.13	Fluxograma exemplo da pesquisa do algoritmo B&B	45
5.1	20 tarefas, 100 indivíduos com 50% de cruzamento e 0.1% de mutação	48
5.2	20 tarefas, 100 indivíduos com 50% de cruzamento e 5% de mutação	48
5.3	20 tarefas, 100 indivíduos com 90% de cruzamento e 0.1% de mutação	48
5.4	20 tarefas, 100 indivíduos com 90% de cruzamento e 5% de mutação	49

5.5	100 tarefas, 100 indivíduos com 50% de cruzamento e 0.1% de mutação . .	49
5.6	100 tarefas, 100 indivíduos com 50% de cruzamento e 5% de mutação . . .	49
5.7	100 tarefas, 100 indivíduos com 90% de cruzamento e 0.1% de mutação . .	50
5.8	100 tarefas, 100 indivíduos com 90% de cruzamento e 5% de mutação . . .	50
5.9	100 tarefas, 500 indivíduos com 50% de cruzamento e 0.1% de mutação . .	51
5.10	100 tarefas, 500 indivíduos com 50% de cruzamento e 5% de mutação . . .	51
5.11	100 tarefas, 500 indivíduos com 90% de cruzamento e 0.1% de mutação . .	51
5.12	100 tarefas, 500 indivíduos com 90% de cruzamento e 5% de mutação . . .	52
5.13	Diagrama de <i>Gantt</i> da solução apresentada pela empresa	55
5.14	Diagrama de <i>Gantt</i> da solução apresentada pelo AG	56
5.15	Janela da solução apresentada pela empresa	57
5.16	Janela da solução apresentada pelo algoritmo B&B	58
B.1	Janela de visualização de atribuições às máquinas de corte e cravação . . .	69
B.2	Janela de aviso de quantidade insuficiente para produto selecionado	70

Acrónimos

ACO Ant colony optimization

AG Algoritmo genético

AIS Artificial immune systems

ATCS Apparent tardiness cost with setups

B&B Branch-and-Bound

BD Base de dados

BOM Bill of materials

CE Conformité Européenne

CRP Capacity requirements planning

EDD Earliest due date

ERP Enterprise resource planning

FFS Flexible flow shop

FIFO First in first out

GNS Georgina Neto dos Santos, Lda

HFS Hybrid flow shop

MBO Managemen buy-out

MES Manufacturing execution systems

MPS Master production schedule

MRP Material requirements planning

MRP II Manufacturing resources planning

NN Neural Networks

OX Order Crossover

PCP Planeamento e controlo da produção

PLC Programmable logic controller

PP Planeamento da produção

SA Simulated annealing

SCADA Supervisory control and data acquisition

SPT Shortest processing time

SQL Structured query language

TS Tabu search

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo introdutório pretende-se apresentar de uma forma geral o trabalho realizado. Na secção 1.1 é apresentada uma breve contextualização do trabalho, assim como a relevância deste tema para as empresas. Seguidamente na secção 1.2 é abordado sucintamente o problema estudado e posteriormente, na secção 1.3, os resultados esperados para o trabalho desenvolvido. Por último, na secção 1.4 é apresentada a organização desta dissertação.

1.1 Contexto

Sabendo que o mundo empresarial está cada vez mais competitivo impõe-se a redução de custos e tempos de produção.

Para tal, os sistemas de planeamento e controlo da produção (PCP) surgem com o intuito de facilitar e automatizar os processos com a finalidade de maximizar os lucros da empresa. Estes sistemas englobam um conjunto de medidas destinadas a assegurar a produção dos produtos para os prazos estabelecidos. Sendo capazes de definir quando, quanto, e o que produzir, assim como, fiscalizar o processo para garantir a execução das tarefas planeadas.

Posto isto, este tema surge com o propósito de resolução de alguns problemas e melhorias a realizar ao nível da gestão dos processos, envolvendo o planeamento e o controlo das operações na produção, apresentados pela empresa GNS¹, de forma a tornar-se mais competitiva no mercado.

1.2 Problema

A empresa apresentou como principais áreas de intervenção o planeamento das tarefas de produção e gestão da mercadoria existente.

Na fase de planeamento da produção (PP) existem melhorias a realizar visto ser um processo manual e baseado na experiência dos colaboradores associados a esta tarefa. Este PP tem por base um sistema *PULL*², considerando não só as necessidades dos clientes e de fim-de-linha como também o stock existente.

¹GNS - Georgina Neto dos Santos, Lda

²*PULL* é uma filosofia produtiva, orientada pelo cliente, na medida em que, a produção é baseada na procura real.

O planeamento das tarefas relativas às encomendas de produtos acabados é efetuado semanalmente de acordo com as encomendas realizadas ao longo da semana. Contudo, para dar resposta às encomendas com a maior brevidade possível a empresa dispõe de um stock de intermédio de componentes. De onde são geradas diariamente tarefas para a produção, com níveis de prioridade associados à quantidade existente dos componentes correspondentes. Sendo a informação relativa às quantidades dos componentes baseada numa estimativa aproximada pela percentagem de existências nos contentores. Relativamente às quantidades de produto acabado, esta é uma operação mais morosa, na medida em que semanalmente os colaboradores gastam cerca de quatro horas na verificação das quantidades existentes.

Além disto, todo o controlo em tempo real da produção é apenas possível presencialmente pelos colaboradores.

1.3 Resultados esperados

O objetivo principal para esta dissertação é o desenvolvimento de uma ferramenta capaz de efetuar o planeamento e controlo da produção.

Esta deverá ser capaz de realizar o sequenciamento das tarefas relativas aos postos a melhorar através de um algoritmo a propor. Este terá que ter em conta o sistema *PULL*, considerando o stock efetivo e as encomendas realizadas no caso da produção de fim-de-linha ou as encomendas fixas dos clientes. Este sistema também terá de ser flexível de forma a possibilitar a realização de alterações no PP, mais especificamente no sequenciamento das ordens de fabrico obtidas através do algoritmo. Sendo que desta forma o utilizador terá possibilidade de modificar a solução proposta pelo algoritmo, e se possível verificar os efeitos dessas alterações.

Relativamente ao controlo da produção, é esperado que o sistema seja capaz de gerar informação atualizada sobre o estado da produção de forma a supervisionar e controlar a mesma. Para tal deverá ser proposto um sistema de aquisição de dados assim como a estruturação de uma base de dados para registo de toda a informação.

Espera-se assim uma otimização da produção associada a uma redução dos custos de planeamento e controlo.

1.4 Organização da dissertação

A dissertação encontra-se organizada em seis capítulos incluindo o atual.

Inicialmente é apresentada uma breve descrição da empresa, no capítulo 2, para contextualização do problema.

De seguida, o capítulo 3 inclui um estudo dos principais conceitos abordados assim como, um estudo de trabalhos e pesquisas desenvolvidas relacionadas com o âmbito deste trabalho. Neste capítulo é também apresentada uma análise das soluções comerciais existentes para o planeamento e controlo da produção.

No capítulo 4 é apresentada a arquitetura da solução e é demonstrado o trabalho desenvolvido para a implementação do sistema proposto.

Para verificação dos resultados obtidos é apresentado no capítulo 5 uma análise e discussão de resultados.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões relativas ao trabalho desenvolvido na presente dissertação, incluindo propostas para futuros desenvolvimentos do sistema proposto.

Capítulo 2

A Empresa

A GNS é uma empresa industrial localizada no concelho de Águeda, e apresenta ao mercado uma vasta gama de fechaduras e acessórios para caixilharia, seja em perfis de alumínio, ferro ou aço inoxidável. Na figura 2.1 é possível observar uma fotografia do exterior da empresa.



Figura 2.1: Instalação fabril da GNS

A empresa dispõe de um departamento de investigação e desenvolvimento de produto para dar resposta às reais necessidades do mercado, apresentando regularmente no mercado novos produtos e soluções inovadoras. Através desta capacidade de pesquisa e desenvolvimento a empresa acompanha as principais tendências de design, economia e conforto. No sentido de proteção da propriedade industrial e da exclusividade alguns dos produtos desenvolvidos, de elevado potencial e valor acrescentados, são patenteados. A empresa é responsável pela patente da principal fechadura vendida a nível ibérico (7715), sendo também o único fabricante português do sistema de ventilação passiva -

ANCOVENT. [14]

Todos os produtos produzidos na empresa são sujeitos a ensaios de qualidade, e estão certificados e homologados de acordo com os requisitos da marcação CE.

A procura pela obtenção de um produto de qualidade inicia-se desde logo pela escolha criteriosa dos fornecedores de matéria-prima.

A empresa está classificada sob a forma de sociedade de responsabilidade limitada desde 2000, resultado de um MBO¹ de uma empresa Portuguesa com mais de 50 anos de experiência. [14]

2.1 Análise dos produtos

A empresa apresenta três áreas principais de intervenção: a produção de fechaduras, de oscilobatente e acessórios.

A tipologia de fechaduras produzidas divide-se em:

- Monoponto - composta apenas por uma caixa central. Na figura 2.2a é representado um dos modelos relativos a esta tipologia;
- Multiponto - constituída por uma caixa central e mais dois, quatro ou seis pontos de fixação. Na figura 2.2b é possível observar a fechadura 7715 de 3 pontos de fixação, caixa central e mais duas caixas nas extremidades;
- Elétricas - fechaduras acionadas eletricamente. Na figura 2.2c pode-se observar um dos modelos de fechaduras elétricas produzidos pela empresa.



(a) 7716



(b) 7715



(c) Nuova500

Figura 2.2: Tipo de fechaduras [13]

¹MBO - *Managemen Buy-Out*, uma operação que se traduz na tomada de controlo do capital de uma dada sociedade. [23]

Os oscilobatentes caracterizam-se pela existência de um eixo de rotação adicional ao tradicional eixo vertical. Este sistema possui um eixo de rotação horizontal permitindo desta forma conciliar a segurança e conforto. Assim, este sistema proporciona uma abertura para entrada de ar mantendo a segurança necessária, na figura 2.3 é possível ver uma janela dotada deste sistema.



Figura 2.3: Janela oscilobatente [32]

Por fim, a empresa dispõe de uma gama variada de acessórios, como por exemplo: puxadores, fechos e dobradiças, demonstrados na figura 2.4.



(a) Puxador muleta



(b) Fecho



(c) Dobradiça

Figura 2.4: Alguns exemplos de acessórios [12]

Todos estes produtos são alvo de investigação para obtenção de produtos cada vez mais leves, resistentes, silenciosos e de funcionamento suave. A Empresa disponibiliza assim um variado conjunto de produtos para o fabrico de portas e janelas, todos estes de elevada qualidade a um preço competitivo.

2.2 Análise da faturação

A empresa apresenta uma faturação anual aproximada de 5.000.000€ dos quais 50% provêm de exportação.

Com o intuito de saber qual a dependência da empresa aos diferentes produtos pro-

duzidos, a firma decidiu efetuar um estudo semelhante a uma análise ABC². Para tal, foi decidido considerar os itens mais relevantes na faturação até obtenção de 75% da faturação total. Destes 75% foi constatado que aproximadamente 58% são relativos a produção interna e cerca 17% relativos a mercadorias e produtos marginais. Na figura 2.5 é possível observar mais em detalhe a distribuição da faturação analisada.

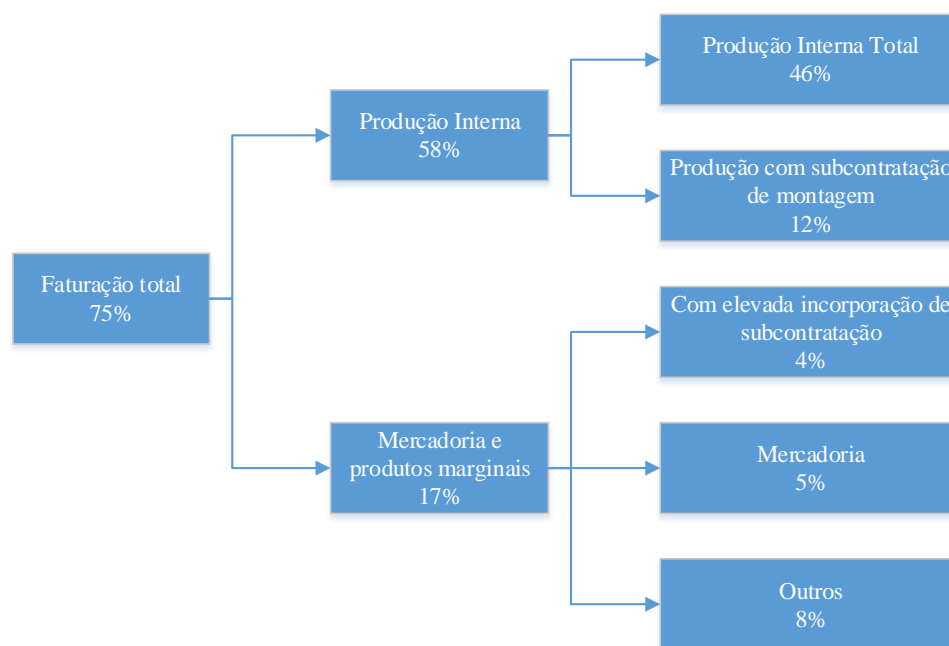


Figura 2.5: Análise faturação

Assim sendo, se a empresa responder à procura de todos os itens considerados nesta análise a empresa assegura 75% do rendimento anual, isto considerando que os padrões de procura não se alteram significativamente de um ano para outro. Esta análise também foi considerada para priorização das tarefas na produção. Para tal, foram considerados todos os produtos abrangidos nos 58% da produção interna. Sendo posteriormente ordenados pela percentagem de faturação para definição de uma lista de prioridades.

Deste modo, é possível observar na figura 2.6 a ordenação dos produtos por ordem decrescente de prioridade, da esquerda para a direita, para o ano de 2013. Sendo também apresentadas as percentagens de faturação destes produtos para os anos de 2009 e 2011.

Tendo em conta que existe uma diferença de dois anos entre os dados analisados, podemos afirmar que a diferença na priorização das ordens de tarefas do ano 2011 para o ano 2013 não é significativa. A diferença acentuada do ano 2009 deve-se à recente incorporação das fechaduras 7715 e 7716 no mercado.

Desta forma, obtém-se um quadro elucidado da gama de produtos que contribuem de forma acentuada para o rendimento anual da empresa. Sendo que as fechaduras 7715 e 7716 abordadas neste trabalho posicionam-se nos lugares de maior importância.

²Uma análise ABC visa separar os produtos em 3 grupos baseados na dependência da empresa face a estes.

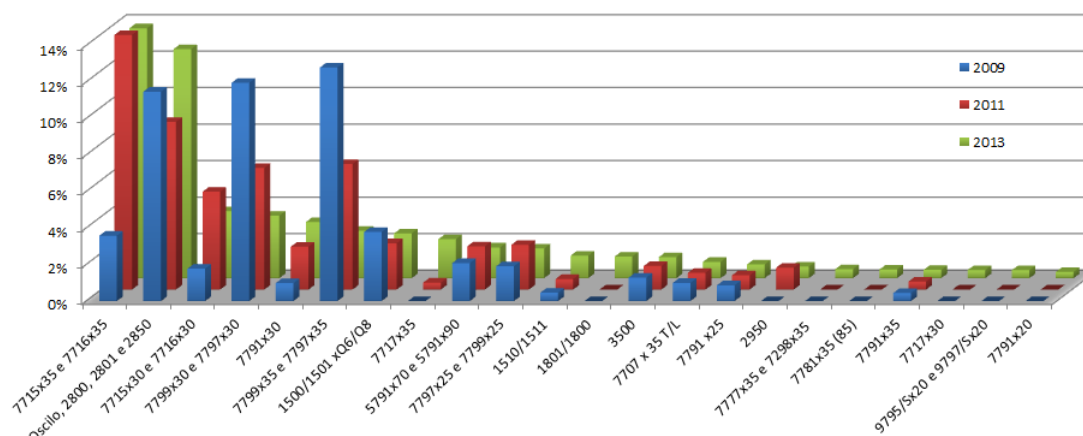


Figura 2.6: Percentagens de faturação dos produtos

2.3 Análise da produção

As instalações fabris dispõem de uma área aproximada de $7000m^2$ onde trabalham cerca de 70 colaboradores. Na figura 2.7 está representado esquematicamente o layout fabril.

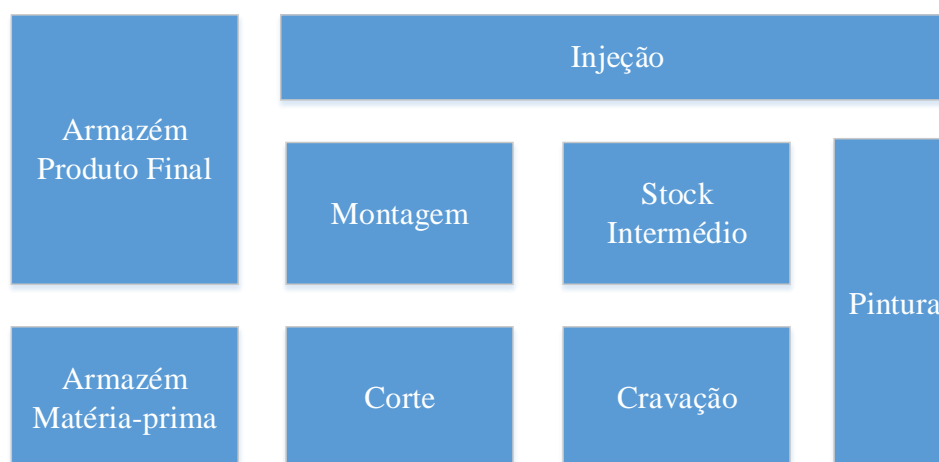


Figura 2.7: Esquema do layout fabril

O processo produtivo é baseado no método *PULL* combinado com o método das cores. Seguindo a filosofia *PULL* a produção dos produtos baseia-se na procura destes no mercado. Portanto, os componentes só são produzidos caso sejam necessários, seja para garantir o stock mínimo no stock intermédio, seja para responder às encomendas. As cores verde, amarelo e vermelho indicam o grau de prioridade das ordens de produção dos semi-acabados, visto que estas cores traduzem a quantidade disponível destes componentes nos contentores no stock intermédio. Por exemplo, a atribuição da cor vermelha a um contentor indica que a quantidade do componente existente nesse contentor está em risco

de rutura de stock, representando uma previsão de uma semana até que este esgote. Já as cores amarelo e verde representam a existência de produtos para pelo menos 3 e 5 semanas, respetivamente. Portanto, o planeamento da produção de componentes para o stock intermédio organiza-se dos mais prioritários, com atribuição de cor vermelha, para os menos prioritários, com cor verde. Sendo que componentes com atribuição da mesma cor são desempatados pela ordenação fornecida pela análise ABC abordada na secção 2.2.

O processo produtivo é iniciado pela escolha de matéria-prima de qualidade. A matéria-prima baseia-se essencialmente em alumínio, aço e aço inoxidável fornecido sob a forma de rolo ou barras. Esta é armazenada no armazém de matéria-prima, ilustrado na figura 2.8.



Figura 2.8: Armazém matéria-prima

Após a seleção do material este segue para o corte. No estágio de corte existem cinco prensas mecânicas, duas de alimentação automática (designadas ao longo do trabalho por B1 e B2) e três de alimentação manual (designadas por B3, B4 e B5). Estas prensas, por vezes também designadas por balancés, são em geral caracterizadas por frequências de trabalho superiores em comparação com as prensas hidráulicas. Na figura 2.9 é possível observar parte deste estágio de corte.

Após a obtenção da forma pretendida o componente pode seguir diretamente para os contentores de produtos semi-acabados, ou continuar para o estágio seguinte, de cravação, caso necessite de introdução de cravos. Estes cravos são pinos metálicos que servem para o alinhamento e montagem de outros componentes na peça. Este estágio é constituído por três máquinas (designadas por C1, C2 e C3 ao longo do trabalho). Na figura 2.10 é apresentada uma fotografia deste estágio.

Pode-se desta forma classificar os estágios de corte e cravação como *Hybrid Flow Shop* (HFS). Em ambas as etapas existem máquinas idênticas, com características iguais entre si, e máquinas não relacionadas, com características diferenciadas devido ao tipo de ferramentas utilizadas. Este ambiente produtivo será abordado mais em detalhe na secção 3.1.



Figura 2.9: Máquinas de corte



Figura 2.10: Máquinas de cravação

Após estes dois estágios o componente pode sofrer algum tipo de tratamento - como por exemplo pintura, niquelagem ou zincagem - ou seguir diretamente para o stock intermédio. No anexo A é apresentada a árvore do produto da fechadura 7715 fornecida pela empresa para melhor perceção dos movimentos de material e tipos de operações realizadas.

Caso existam ordens de fabrico para a montagem, os componentes necessários para cumprir estas ordens seguem do stock intermédio para a montagem. Na figura 2.11 é possível observar os postos de montagem, assim como alguns dos contentores do stock intermédio de cor azul.

Esta secção fabril é composta por duas linhas de montagem uma responsável pelas fechaduras e outra destinada aos restantes produtos. Sendo que o âmbito deste trabalho abrange somente a linha referente à de montagem fechaduras, onde existem dois estágios. O primeiro estágio é comum a todas as fechaduras, é neste posto onde se efetua a montagem da caixa central da fechadura. Para o segundo estágio só seguem as fechaduras com mais de um ponto de fixação, para colocação das réguas e das caixas nas extremidades.



Figura 2.11: Postos de montagem

Para além dos estágios mencionados existe também uma secção de pintura e injeção. Na secção da pintura, os componentes podem ser sujeitos a pintura eletrostática com a finalidade de revestimento e de decoração. No estágio de injeção são produzidos acessórios e componentes em ZAMAK³ e plástico. Contudo estes dois processos não são abrangidos no âmbito de estudo deste trabalho.

Assim sendo, na figura 2.12 é apresentado um esquema simplificado do processo produtivo analisado neste trabalho.

³ZAMAK - liga de metal composta por zinco (95%), alumínio, magnésio e cobre [25]

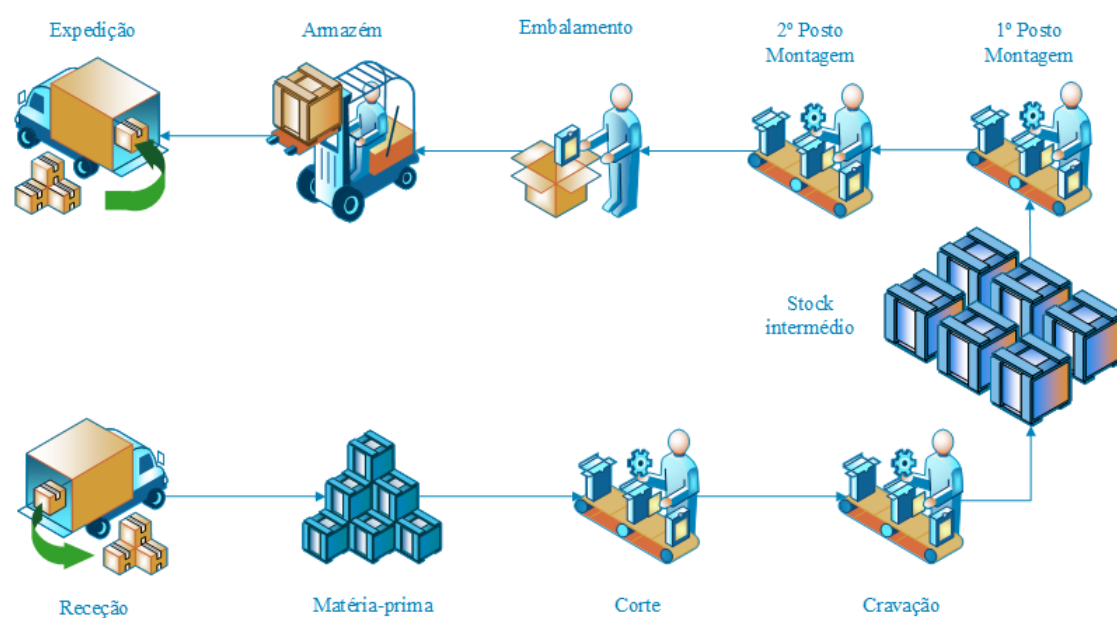


Figura 2.12: Esquema simplificado do fluxo dos materiais em análise

Capítulo 3

Revisão do Estado da Arte

3.1 Conceitos

O planeamento e controlo da produção tem como principais tarefas gerir de forma eficiente o fluxo de material, gestão de pessoas e equipamentos, para responder às necessidades dos clientes. [45] Como tal, “os problemas de planeamento e controlo da produção são problemas de otimização por inerência, onde o objetivo é desenvolver um plano que atenda a procura a um custo mínimo ou que preencha a procura que maximiza o lucro.” [17]

Na figura seguinte é possível observar a estrutura de um sistema de PCP proposto por Vollman.

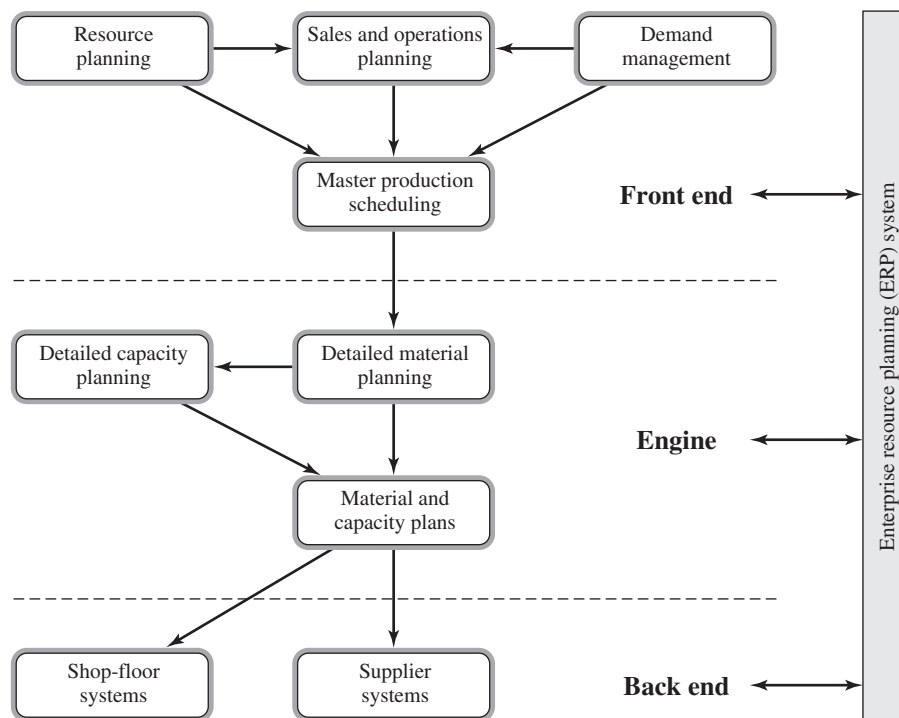


Figura 3.1: Estrutura de um sistema PCP [45]

A primeira fase da estrutura apresentada estabelece a direção geral da empresa para o planeamento e controlo da produção. As atividades da *Demand Management* englobam previsões de procura, entrada de pedidos e requisitos de reposição de stock. Em suma, a *Demand Management* coordena todas as atividades do negócio que colocam exigências sobre a capacidade de produção. *Sales and Operations Planning*, balança vendas e planos de marketing com os recursos de produção disponíveis. O resultado é um plano que determina o papel da produção no cumprimento da estratégia definida pela empresa. O *Master Production Schedule (MPS)* apoia o plano de vendas e operações declarando quais os produtos a produzir. *Resource Planning* determina as capacidades necessárias para produzir os produtos requeridos, sendo a base para combinar planos de fabricação e capacidade. [45]

A segunda fase abrange o conjunto de sistemas de planeamento detalhado de material e capacidade. O *MPS*, gerado anteriormente, alimenta diretamente o módulo de planeamento detalhado de material. Neste módulo é usada a lógica do *MRP (Material Requirements Planning)*, determinando assim a quantidade necessária dos componentes e matéria-prima para produção dos produtos no *MPS*. Este também contém informação relativa a quando se deve produzir/comprar, de modo a maximizar a eficiência das operações e minimizar o investimento em stock. Este plano é especialmente importante para empresas que produzem uma grande variedade de produtos com muitos componentes por produto. O plano de material resultante pode depois ser utilizado nos sistemas de planeamento detalhado de capacidade para calcular a capacidade de trabalho e/ou máquinas necessárias para produzir todos os componentes. No caso dos sistemas *MRP II (Manufacturing Resources Planning)*, melhoramento do *MRP*, para além de conter as funções de um *MRP*, possuem capacidades de análise da disponibilidade dos recursos.

A terceira fase retrata os sistemas de execução do PCP. Os *Supplier Systems* oferecem informações detalhadas para os fornecedores da empresa. Neste caso, informação necessária para fornecimento de material para responder aos planos gerados na fase anterior. Para o bom funcionamento deve existir uma regular atualização da informação entre empresa e fornecedores, podendo esta comunicação incluir planos futuros para ajudar a responder às necessidades de ambos. Os *Shop Floor System* adotados variam de acordo com o tipo de produtos fabricados e processos de produção utilizados na empresa. Estes podem ser responsáveis pela aquisição de dados e/ou estabelecer prioridades para cada posto de trabalho. [45]

O esquema representado é suportado por diversos sistemas e softwares de PCP existentes no mercado. Em que estes normalmente estão ligadas a outras atividades de negócio através de sistemas ERP (*Enterprise Resource Planning*). Estes sistemas *ERP* tentam integrar as funções de vários departamentos, de forma a facilitar o fluxo de informação entre os vários sectores empresariais. Podendo assim o sistema PCP fornecer informação aos sistemas financeiros, distribuição, marketing e recursos humanos de forma facilitada. [45]

Ao nível do chão de fábrica, para melhor perceção do tipo de problema, é necessário estudar os diferentes tipos de ambientes fabris. Segundo Pinedo [38] podemos dividir estes em cinco categorias:

- *Flow shop* - caracterizado pela existência de m máquinas em série. Cada tarefa tem que ser processada em cada uma das m máquinas, seguindo sempre o mesmo percurso, começando na máquina 1 e terminando na máquina m . Terminada a

operação numa máquina esta tarefa passa para a fila de espera da seguinte máquina. Normalmente, estas filas de espera são assumidas para operar sob a disciplina *FIFO* (*First In First Out*), ou seja, não são permitidas permutações à ordem de chegada;

- *Flexible flow shop* (FFS) - este sistema também conhecido por *Hybrid Flow shop* ou *multi-processor flow shop* é uma generalização do *Flow shop*. Em vez da existência de m máquinas em série, existe uma série de c estágios, em que o número mínimo de estágios é 2, ($c \geq 2$). Em cada estágio k existe $M^{(k)}$ máquinas em paralelo, em que $M^{(k)} \geq 1$ e pelo menos um estágio $M^{(k)} > 1$. E tal como no *Flow shop*, as ordens têm que seguir a mesma sequência de produção, podendo contudo saltar qualquer número de estágios desde que seja processado em pelo menos um; [41]
- *Job shop* - este ambiente produtivo é caracterizado pela existência de uma ordem de processamento pré-definida para cada tarefa. Não sendo necessário que a tarefa percorra as m máquinas do sistema;
- *Flexible job shop* - neste sistema, tal como no FFS, em vez da existência de m máquinas existem c centros de trabalho. Em cada centro de trabalho existe um determinado número de máquinas idênticas, capazes de realizar as mesmas operações;
- *Open shop* - Neste tipo de sistema não existe restrições no que diz respeito ao encaminhamento de cada tarefa no ambiente produtivo.

Para o acompanhamento do estado do planeamento estabelecido para a produção, nos diferentes tipos de ambientes fabris vistos anteriormente, os *Shop Floor System* normalmente possuem sistemas de controlo do chão de fábrica (*Shop Floor Control*). Estes sistemas são responsáveis pela gestão detalhada das atividades e materiais a nível do chão de fábrica. [6] Por exemplo, na existência de sistemas de aquisição de dados e supervisão como os sistemas *SCADA* (*Supervisory Control and Data Acquisition*) é possível obter informações atualizadas sobre quantidades, utilização e produtividade de mão-de-obra e máquinas. Informação esta, necessária para o correto planeamento global e escalonamento das operações dentro da fábrica. Sendo que na existência de um terminal gráfico junto ao operador é possível receber atualizações em tempo real de alterações no escalonamento das operações.

Os sistemas *MES* (*Manufacturing Execution Systems*) têm preenchido a falha entre os sistemas de planeamento de produção (*MRP*, *MRP II*, ...) e os sistemas de controlo de equipamentos no chão de fábrica. [34] Michael McClellan definiu o *MES* como “um sistema informatizado integrado online que é a acumulação dos métodos e ferramentas utilizadas para realizar a produção”. [34] Este sistema é assim responsável pelo correto tratamento de dados, dispondo a informação necessária no momento e local certo. Portanto, através da utilização de um sistema de controlo de chão de fábrica englobado num sistema *MES* é possível melhorar a produtividade e eficiência da fabricação.

3.2 Soluções acadêmicas propostas por outros

3.2.1 Projeto de desenvolvimento de um sistema de planejamento de produção na Pecol 2

Este projeto engloba um plano de reestruturação para a empresa Pecol ao nível do planejamento da produção. “Devido às deficiências do sistema de planejamento de produção, a empresa decidiu fazer o desenvolvimento de um sistema de planejamento de produção baseado em Tecnologias de Informação”. [40]

O trabalho iniciou-se pela realização de um estudo para tomada de decisão do modo de conceção do sistema, isto é, pela opção de desenvolvimento do sistema internamente ou pela aquisição de um software. Deste modo, para a tomada de decisão do problema multi-atributo, requisitos e objetivos, foi utilizada como ferramenta de decisão o modelo aditivo de valor. Este modelo de agregação é dos mais utilizados devido à sua simplicidade.

Seja $v_j(a_i)$ o valor local segundo o j -ésimo ponto de vista ($j = 1, \dots, n$) de uma ação a_i . Então, a função de valor aditiva agrega estes valores através da soma ponderada onde intervêm n coeficientes de escala k_1, \dots, k_n , dada pela equação 3.1.

$$V(a_i) = \sum_{j=1}^n k_j v_j(a_i) \quad (3.1)$$

Para este caso os objetivos foram classificados com os seguintes valores locais apresentados na tabela, isto é, à importância de cada um deles para a empresa.

- Simplicidade na satisfação dos requerimentos, $k_1 = 0,4$;
- *User-Friendly*, $k_2 = 0,2$;
- Preço, $k_3 = 0,1$;
- Manutenção/Desenvolvimento, $k_4=0,1$;
- Perspetivas do relacionamento com vendedor de software, $k_5=0,2$.

O autor analisou um conjunto de dez softwares baseado nos requisitos propostos pela Pecol, dos quais destacou três, às quais foram pedidas propostas de implementação. Da análise das soluções apresentadas pelas empresas convidadas resultou a avaliação presente na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Avaliação das soluções propostas [40]

	Simplicidade satisfação requerimentos	<i>User- Friendly</i>	Preço	Manutenção/ Desenvolvi- mento	Relaciona- mento	Resultado
Softi9	0.80	1	0.50	0.33	0.50	0.703
Manufactor	0.40	0.60	1	0.33	0.25	0.463
GPAC	0.40	0.40	1	0.33	0.25	0.423
PECOL	0.80	0.80	0.80	1	1	0.860

Pela análise da tabela 3.1 o autor optou pelo desenvolvimento interno do sistema.

Posto isto, o autor propôs um conjunto de interfaces a desenvolver.

Foi também proposta a utilização da regra heurística *ATCS* (*Apparent Tardiness Cost with Setups*) apresentada por Pinedo. Esta heurística tem como objetivo a minimização do atraso total ponderado em que as tarefas tem tempos de *setup* dependentes do sequenciamento. [38]

De forma, a adequar este algoritmo à realidade da Pecol, foi proposta a inclusão de um fator para a flexibilidade no escalonamento, também proposto por Pinedo, para o escalonamento em HFS, isto porque a Pecol apresenta também este ambiente produtivo. Foi também proposta a implementação de tempos de processamento e *setup* dependentes da máquina escolhida.

Contudo, o algoritmo descrito no presente relatório não foi completamente desenvolvido até à data do mesmo, de forma a ser implementado e analisar os resultados obtidos.

3.2.2 Desenho de uma nova ferramenta de planeamento da produção de transformadores Core na EFACEC Energia

Este projeto surge com o objetivo de selecionar e estruturar uma ferramenta de apoio ao planeamento da produção de transformadores Core que possibilite a integração e a coordenação dos centros de trabalho em tempo real e, simultaneamente, tornar visível e imediato o desempenho da fábrica. E desta forma, garantir a competitividade através de melhores respostas aos clientes e processos mais eficientes. [33]

O problema levantado neste projeto consiste na lacuna de um suporte informático que apoie as tarefas de preparação e controlo de um processo produtivo bastante complexo e peculiar. “A ferramenta utilizada para o efeito apresenta alguns pontos fracos em termos de gestão de informação.” Esta é baseada na utilização de um *ERP*, o Baan, que recebe os dados dos departamentos de cálculo e projeto, trata-os e insere-os num programa interno denominado WinTree, o qual, por sua vez, devolve informação ao Baan. O Baan inclui fundamentalmente funções de gestão logística e de gestão financeira, enquanto o WinTree especifica o produto e respetivas configurações. O planeamento global da produção é feito numa folha de cálculo do Microsoft Office Excel de acordo com datas de entrega aos clientes, respetivas prioridades e capacidade da fábrica. Resultando numa fraca integração no sistema de informação da empresa e dificultando a difusão desta informação por todos os colaboradores. [33]

Após um estudo aprofundado da lógica do processo produtivo e dos respetivos métodos de planeamentos utilizados, foram especificados os requisitos da ferramenta e selecionado o software Microsoft Office Project para base da aplicação. [33]

A construção da nova ferramenta consistiu na parametrização de acordo com a realidade da fábrica estudada, na personalização do software de acordo com os requisitos especificados e, paralelamente, na documentação dos principais procedimentos. Após o término desta procedeu-se à implementação de um protótipo para realização de alguns testes que permitisse a validação da ferramenta. Na figura 3.2 é possível observar um diagrama do sistema proposto com algumas das interfaces da ferramenta. [33]

Em termos comparativos com a ferramenta em utilização o autor comprovou que, a nova ferramenta reduziu os desvios das previsões, assim como a sua variabilidade, apresentando uma boa correlação entre valores efetivos e previstos. Existindo no entanto algum atraso sistemático dos valores efetivos relativamente às previsões, devido essencialmente a atrasos no fornecimento da cadeia de valor. [33]

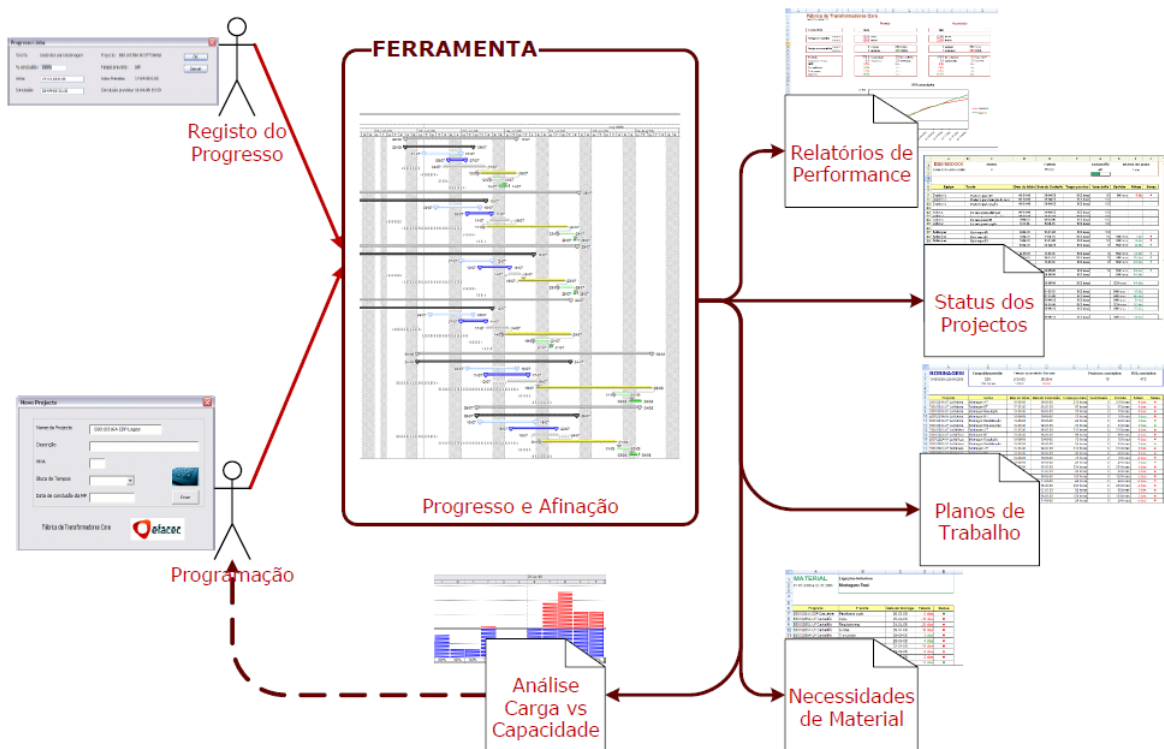


Figura 3.2: Sistema lógico proposto [33]

Em suma, o autor deste trabalho concluiu que “depois da difusão e da integração da nova ferramenta na empresa, esta trará vantagens no sentido de uma maior fiabilidade de registos e, principalmente, na flexibilidade e adequabilidade de utilização. As suas propriedades inovadoras permitem a mobilidade e a visualização imediata da informação mais consistente, rigorosa e controlada. As automatizações da ferramenta permitem a simplificação de tarefas, levando a uma redução do esforço despendido nas funções de planeamento e controlo.” [33]

3.2.3 Planeamento e controlo de produção na Euronete, S.A.

Este estudo teve como principais objetivos a otimização do fluxo de informação do sector produtivo para o cliente, quer no sentido de agilizar a transmissão dessa informação, como também de a tornar mais exata e completa. Neste sentido, a necessidade de adotar um sistema de planeamento que permitisse realizar um controlo sistemático de produção foi vista como um ponto basilar. [18] Como objetivos mais específicos foram apresentados: aperfeiçoamento do método de planeamento da produção das redes, a construção de uma ferramenta de cálculo de peso de redes e a construção de pequenas ferramentas para auxílio de funcionamento da fábrica. Ferramentas que teriam como função auxiliar e automatizar as respetivas tarefas, reduzindo o erro humano e aumentando a fiabilidade da informação no armazém, vendas e produção. [18]

O principal problema da empresa residia na utilização de folhas de cálculo para listar todas as ordens de fabrico e respetivas quantidades, sendo atribuído um tear a cada ordem pelo responsável de planeamento, baseado no seu conhecimento das características dos

teares e na sua importante experiência do funcionamento da produção. Sendo necessárias bastantes horas semanais do planeador para alimentar e formatar essas folhas de cálculo, para a correta obtenção da informação resultante. [18]

Para resolução dos problemas existentes na empresa foi criada uma ferramenta baseada em Visual Basic for Applications Excel alimentada por dados do *ERP* da empresa, Infor LN. Esta ferramenta sofreu posteriormente um processo iterativo de otimizações, correção de erros e implementação gradual. Através da ferramenta desenvolvida é possível determinar as necessidades de materiais e máquinas em termos quantitativos e temporais (*MRP* e *CRP*¹); fornecer apoio ao planeador na tomada de decisões de dimensionamento e escalonamento, ajudando-o a visualizar o impacto dos seus planos através de simulação; possibilitar o controlo da produção, no sentido de planificar concretamente o que se passa no chão da fábrica em cada momento; permitir revisões e alterações periódicas regulares com facilidade. [18]

Na figura 3.3 observa-se um esquema representativo da solução proposta. Visto que a empresa engloba dois focos de produção dependentes, a informação gerada para a produção de redes na Maia serve como *input* para a produção de fios em Boticas, não sendo assim importado o *MPS* mas sim a lista de necessidades gerada na produção de redes na Maia.

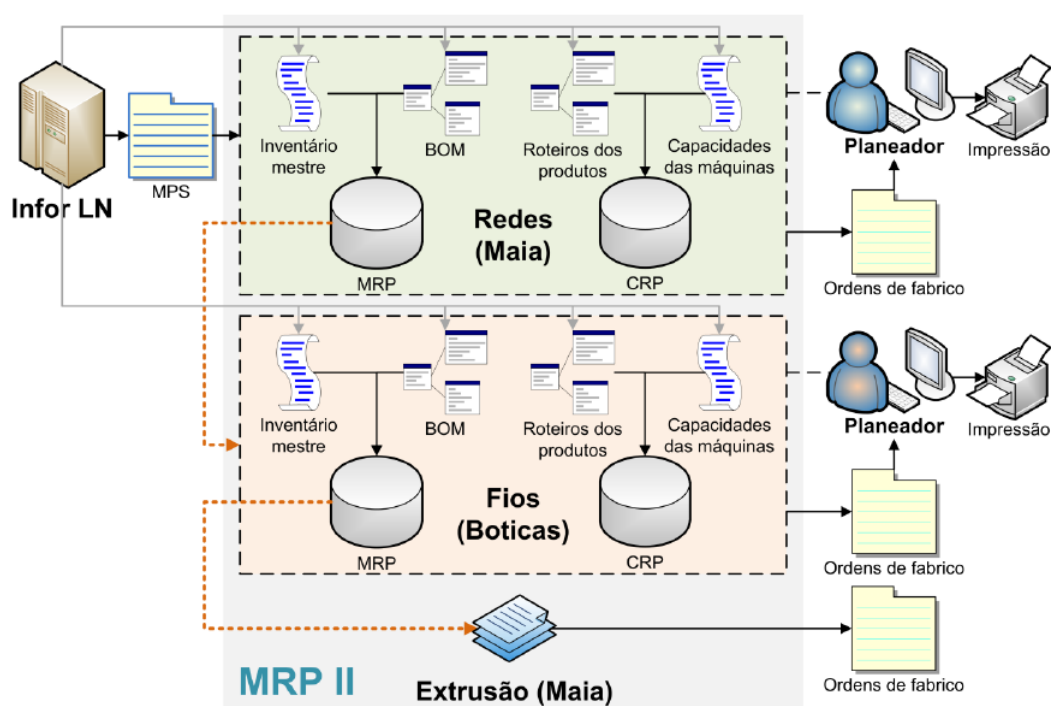


Figura 3.3: Sistema lógico proposto [18]

Um dos maiores benefícios conseguidos face à situação inicial, em que não havia estipulação de datas, reside na comparação imediata dos prazos de entrega transmitidos aos clientes com os prazos estipulados pelas decisões de planeamento.

¹ *CRP - Capacity Requirements Planning*

3.2.4 Análise e projeto de um sistema de apoio ao planeamento de encomendas na Coindu, S.A.

Este trabalho surgiu com o intuito de analisar um sistema de apoio ao planeamento de encomendas internas na Coindu S.A.. Esta é uma empresa inserida no mercado automóvel que se dedica ao fabrico de coberturas para assentos em couro, tecido e PVC. [11]

A Coindu apresentou como problema o processo de planeamento de encomenda existente como sendo pouco flexível, muito trabalhoso e com uma probabilidade de erro elevada. Devido à dispersão da informação por folhas de cálculo Excel (Cálculo de Encomenda semanal, Matriz Capacidade de Produção e Plano de Produção Semanal) e esta ser disponibilizada para os diferentes sectores através de envio de correio eletrónico. Na figura 3.4 é possível observar as deslocações da informação realizadas na empresa. [11]

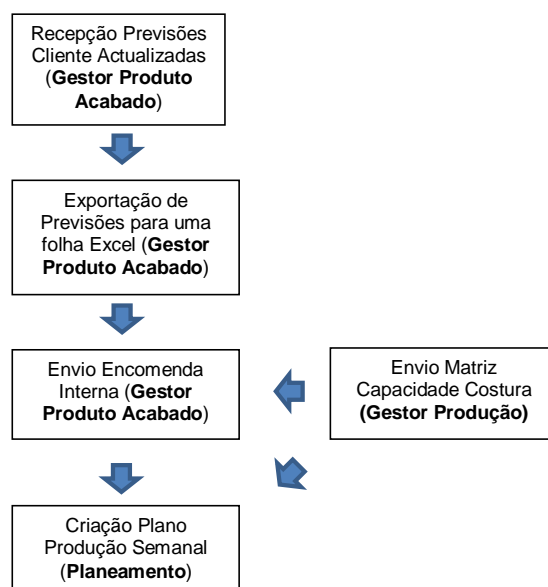


Figura 3.4: Sequência temporal do planeamento de produção na Coindu [11]

Para resolução do problema o autor realizou a análise de uma potencial ferramenta que permitisse: realizar o planeamento de encomendas internas de uma forma automatizada, avaliar o cumprimento do mesmo, monitorizar a ocupação semanal em termos produtivos e permitir que qualquer alteração ao plano semanal de encomendas seja feita de uma forma dinâmica, gerando informações específicas e acessíveis a todos os colaboradores produtivos através de um circuito informático interno existente: SIAP. [11]

O autor utilizou uma metodologia que permitisse o levantamento, definição e validação de requisitos, através de métodos de visualização e simulação do resultado final, recorrendo a uma abordagem com base em protótipos, mais especificamente, num protótipo horizontal. Ou seja, foi optado pela criação da interface do utilizador sem ter o foco nas funcionalidades por trás dos botões existentes nos menus, demonstrando superficialmente toda a interface e ficando muito próximo do produto final do sistema. Sistema este a implementar no software já existente (SIAP). [11]

Ao longo do desenvolvimento dos menus em softwares de desenho o autor foi construindo o diagrama de classes para descrever o modelo geral de informação.

Apesar da aplicação que resultou deste estudo não ter sido implementada até à data do presente relatório, o autor previu que, após a sua implementação se obtenham algumas melhorias ao nível do processo de planeamento de encomendas internas e consequentemente em termos de avaliação do cumprimento de planos de produção. [11]

3.3 Soluções comerciais atuais

Para as empresas se manterem num patamar de competitividade elevado, necessário para acompanhar o avanço tecnológico, as empresas precisam de uma gestão adequada dos seus recursos, dados e procedimentos. Com o intuito de auxiliar as empresas a enfrentar estes desafios atuais do mercado, têm sido desenvolvidos diversos softwares comerciais para planeamento e controlo da produção, alguns deles referenciados nos trabalhos abordados na secção 3.2.

Pode-se destacar entre uma vasta gama alguns dos mais conhecidos e utilizados pelas empresas como por exemplo: PHC Manufactor, Primavera Manufacturing, Sistrade e Softi9. Todos estes apresentam-se como sistemas de gestão da produção apresentando como principais benefícios:

- Redução de custos operacionais;
- Consistência, fiabilidade, qualidade da informação;
- Disponibilidade de informação;
- Automatização de processos na Empresa.

Como principais desvantagens destes softwares pode-se destacar:

- Elevado custo de implementação;
- Risco de prejuízo financeiro ou desempenho com erros inesperados;
- Elevado tempo de implementação;
- Dificuldade de integração com sistemas existentes;
- Pouca flexibilidade aos colaboradores da empresa;
- Dependência do fornecedor do serviço.

Algumas empresas de forma a integrar a informação de vários departamentos optam pela adoção de sistemas de gestão empresarial do tipo *ERP*.

Estes sistemas de informação integram assim todos os dados e processos de uma organização num único sistema. Desta forma é possível tornar a comunicação entre os diversos departamentos de uma empresa mais fácil e menos custosa.

No entanto, uma grande parte das soluções existentes possuem excelentes módulos de contabilidade, orçamentos e controladoria mas carecem na integração da dinâmica do ambiente produtivo.

Existem diversos softwares disponíveis no mercado do qual se podem destacar o SAP, Oracle, Microsoft Dynamics, SAGE, Infor, Lawson e QAD.

Todas estas soluções apresentam como principais vantagens a integração de diversos processos internos de forma fiável e rápida; apoiar na tomada de decisões e tornar estas mais rápidas e com menos erros; fornecer uma visão empresarial abrangente; e diminuir os erros humanos. [1]

As desvantagens são semelhantes às apresentadas a cima para os softwares de PCP.

É neste contexto que surgem alguns softwares *Open Source* como por exemplo: Compiere, Open for Business, Openbravo, WebERP e ERP5. Estes surgem no mercado com o intuito de se apresentar como uma solução de baixo custo em comparação com as anteriores. Alguns destes disponibilizam também uma versão comercial com apoio ao cliente por um preço relativamente reduzido. Contudo, a maior parte deles não apresentam qualquer apoio, deixando a empresa por conta própria em eventuais problemas. Outra das desvantagens destes softwares *Open Source* pode ser o tempo de personalização para responder às necessidades específicas de cada empresa. A linguagem de programação do software pode também limitar a escolha da ferramenta, pois se forem necessárias grandes alterações é aconselhável que o colaborador responsável pela tarefa esteja familiarizado com a linguagem. As atualizações dos softwares também podem ser responsáveis por gastos imprevistos.

Posto isto, optou-se pelo desenvolvimento de uma ferramenta específica para os problemas apresentados mas ao mesmo tempo flexível, apresentando desta forma boas soluções e possibilidades aos colaboradores de alterar esses planos.

3.4 Algoritmos

A utilização de algoritmos para resolução de problemas industriais tem sido cada vez mais solicitada, revelando-se com grandes potenciais de crescimento através da utilização de computadores cada vez mais rápidos e algoritmos mais inteligentes. Através destes algoritmos é possível obter uma solução ideal ou bastante próxima do ideal, num curto espaço de tempo.

As tarefas de planeamento estão normalmente associadas a problemas de otimização combinatória, caracterizados pelo número finito de soluções possíveis. Um dos mais famosos problemas de otimização combinatória é o *Travelling Salesman Problem*.

Como se pode observar na figura 3.5, é possível classificar os algoritmos de otimização em dois grupos: exatos e heurísticos.

Os algoritmos classificados como exatos, como o próprio nome indica, proporcionam a melhor solução para o problema. São exemplos destes algoritmos: a enumeração completa, o *Branch-and-Bound* (B&B) e *simplex*. Estes algoritmos analisam, explícita ou implicitamente, todas as soluções possíveis do problema, selecionando destas a solução ideal. Contudo, nem sempre é possível estudar todas as soluções de um problema devido ao elevado tempo de cálculo que alguns acarretam. Nesse sentido, para obtenção de uma boa solução num espaço de tempo aceitável, desenvolvem-se heurísticas. Segundo Marco Goldbarg e Henrique Luna “uma heurística é uma técnica que busca alcançar uma boa solução utilizando um esforço computacional considerado razoável, sendo capaz de garantir a viabilidade ou otimalidade da solução encontrada ou, ainda, em muitos casos, ambas, especialmente nas ocasiões em que essa busca partir de uma solução viável próxima ao ótimo.” [15]

As heurísticas podem ser classificadas genericamente em três categorias: heurísticas

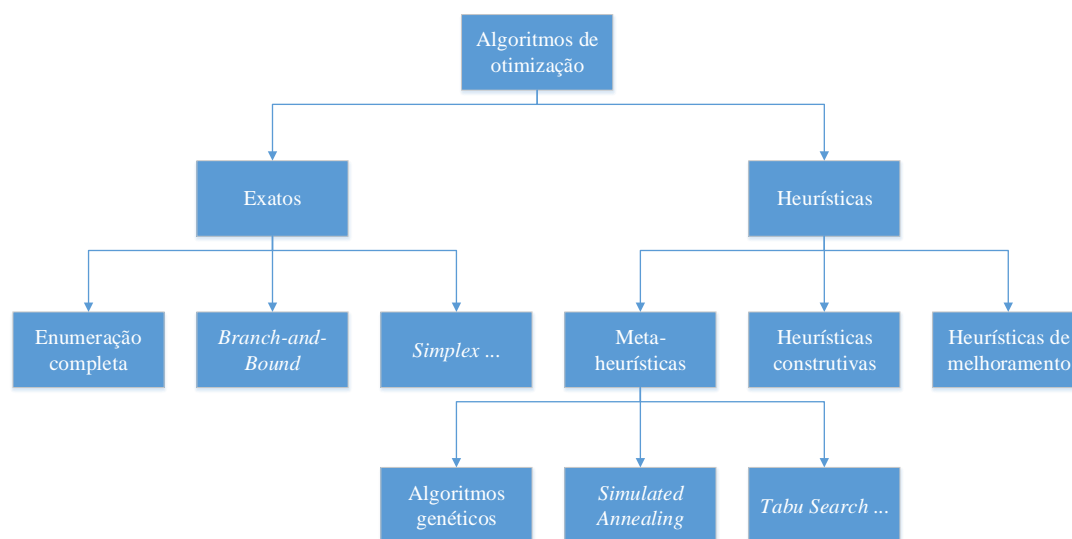


Figura 3.5: Esquema dos tipos de algoritmos de otimização

construtivas, heurísticas de melhoramento e meta-heurísticas.

Os métodos construtivos começam com uma solução inicial vazia e adicionam sucessivamente atividades, uma a uma, até ser obtida a solução final. As atividades são adicionadas ao plano segundo um conjunto de regras pré-estabelecidas até que todas as atividades pertençam à solução final. São exemplos de heurísticas construtivas as heurísticas do vizinho mais próximo, heurística de inserção do mais distante e heurística de inserção do mais próximo.

Os métodos de busca local, ou melhoramento, começam normalmente com uma solução obtida de um método construtivo. Os métodos de busca local aplicam alterações sucessivas à solução existente de forma a melhorar a sua qualidade. Estas operações são aplicadas até que um ótimo local seja alcançado. As heurísticas k-opt e de pesquisa local são exemplos de heurísticas de melhoramento.

De forma a evitar o problema de paragem num ótimo local foram desenvolvidas as meta-heurísticas, tais como: o *tabu search* (TS), *simulated annealing* (SA) e os algoritmos genéticos. [35]

A *tabu search* teve origem em métodos concebidos para cruzar os limites de viabilidade ou de otimização local, normalmente tratados como barreiras, e de forma sistemática restringir ou permitir a exploração de regiões. Este método explora áreas promissoras para manter boas soluções pela rápida eliminação de áreas menos promissoras que são classificadas como tabu. Estas áreas tabus podem por exemplo ser diretamente excluídas ou apenas modificada a sua probabilidade de seleção. [7]

O princípio do método *simulated annealing* surgiu por Metropolis et al. em 1953 [36] com um algoritmo para simular o arrefecimento de um material após tratamento térmico. Ou seja, através deste algoritmo era simulada a troca de energia do sistema durante o processo de arrefecimento até atingir o estado estacionário do sistema. Porém, a meta-heurística *simulated annealing* para a procura de soluções em problemas de otimização foi apresentada apenas três décadas depois em 1983 [29]. Kirkpatrick et al. demonstrou

que o algoritmo de Metropolis para descrever o problema físico de arrefecimento poderia ser utilizado para problemas de otimização através da correspondência dos elementos dos dois problemas mostrados na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Analogia entre problemas de otimização e termodinâmicos [7]

Simulação Termodinâmica	Otimização combinatória
Estados do sistema	Soluções viáveis
Energia	Custo
Mudança de estado	Solução vizinha
Temperatura	Parâmetro de controlo
Estado estacionário	Solução heurística

Deste modo, qualquer algoritmo de otimização local pode ser convertido num algoritmo de *annealing*, sendo que a pesquisa da solução é regida através de regras de aceitação definidas por probabilidades baseadas em leis da termodinâmica². [7]

Os algoritmos genéticos (AG) foram inventados por John Holland por volta dos anos 60 e posteriormente desenvolvidos por si, seus alunos e colegas da universidade de Michigan. O principal objetivo de Holland não foi desenvolver algoritmos para problemas específicos, mas sim estudar formalmente o fenómeno de adaptação ocorrida na natureza e desenvolver formas em que estes mecanismos de adaptação pudessem ser importados para sistemas computacionais. [37] Estabelecendo desta forma uma ligação entre a investigação operacional e a teoria da evolução de Charles Darwin em que este refere que as espécies evoluem pelo princípio da seleção natural e sobrevivência do mais apto.

No livro de Holland, *Adaptation in natural and artificial systems*, é apresentado uma estruturação matemática que torna possível extrair e generalizar fatores dos processos biológicos. Neste livro, são também abordados conceitos relevantes dos AG, como por exemplo o conceito de genes, e operações genéticas (mutação, inversão e cruzamento). [22]

Posto isto, pode-se dizer que um AG é um método de otimização baseado em fenómenos de seleção natural. Visto que a escolha da solução (gene) é feita através da aptidão (fitness) da população de genes, onde a solução com melhor valor de aptidão é escolhida. Baseando-se assim na teoria da sobrevivência do mais apto de Darwin.

3.4.1 Algoritmos no planeamento da produção

O sequenciamento é um processo de tomada de decisão que é usado em muitos sectores industriais e de serviços. Este processo lida com a alocação de tarefas a recursos em determinados períodos de tempo de forma a otimizar um ou mais objetivos. [38] Neste caso específico, planeamento da produção, os recursos podem assumir a forma de máquinas e as tarefas podem ser consideradas operações num determinado processo da produção. Os objetivos neste tipo de problemas podem assumir várias formas. Por exemplo, a minimização do tempo de conclusão da última tarefa (*makespan*) ou o número de tarefas concluídas após as respetivas datas de vencimento. O planeamento da produção,

²Equação para cálculo de probabilidades: $P(\delta E) = e^{(-\delta E/kT)}$, onde E é a energia, T a temperatura e k constante de Boltzmann [7]

como processo de tomada de decisão, desempenha assim um papel importante na maioria dos sistemas de produção, e por isso tem sido alvo de pesquisa.

Em relação aos problemas de HFS, problema existente no sequenciamento da produção na empresa, no corte e cravação, estes tem sido o propósito de várias investigações feitas desde Johnson, no início dos anos 50's, até aos dias de hoje, devido à sua grande aplicabilidade prática. Os HFS são encontrados em diversas pesquisas de cenários reais, por exemplo na indústria eletrônica [26], na construção [16], e no têxtil [19].

Os problemas de HFS são caracterizados por um conjunto de estágios em linha (no mínimo 2), em que cada um destes estágios tem um determinado número de máquinas em paralelo. Sendo necessário que exista pelo menos num estágio mais que uma máquina. O fluxo de produtos é unidirecional ao longo dos estágios, ou seja, todos os produtos seguem a mesma sequência de produção. Cada produto é processado no máximo uma vez em cada estágio, mas sendo necessário que este seja processado pelo menos num estágio. [10]

Problemas HFS são na maioria dos casos de complexidade $\mathcal{NP-hard}$, mesmo no caso de 2 estágios com duas máquinas no primeiro e uma no segundo, comprovado por Gupta em 1988. [21]

No entanto, com um determinado conjunto de restrições de precedência é possível tornar este tipo de problemas solucionável em tempo polinomial. [9]

Quanto à classificação dos problemas de HFS podemos dividi-los de acordo o número de estágios, dois, três ou n estágios, onde as máquinas existentes nestes estágios podem ser identificadas como:

- idênticas (Pm)- o tempo de processamento da tarefa é independente da máquina para cada estágio;
- uniformes (Qm)- cada máquina tem uma velocidade associada v_i , isto é, o tempo de processamento p_{ij} da tarefa j na máquina i é igual a p_j/v_i ;
- não relacionadas (Rm) - as velocidades das máquinas dependem da tarefa, ou seja, a máquina i processa a tarefa j à velocidade v_{ij} . O tempo de processamento p_{ij} da tarefa j na máquina i é igual a p_j/v_{ij} .

Rubén Ruiz e José Vázquez-Rodríguez em [41] analisaram mais de 200 artigos científicos e obtiveram a distribuição de pesquisas demonstrada na tabela 3.3.

Tabela 3.3: Percentagens de artigos analisados em [41] de acordo com o número de estágios e o tipo de máquinas

Número de estágios	Tipo de máquinas paralelas			
	idênticas (%)	uniformes (%)	não relacionadas (%)	total (%)
2	25.12	1.86	4.65	31.63
3	4.19	1.40	0	5.59
n	54.41	1.40	6.97	62.78
Total (%)	83.72	4.66	11.62	100.00

Pode-se observar que o problema de estudo (2 estágios com máquinas não relacionadas) ainda está pouco desenvolvido em comparação por exemplo com dois estágios com

máquinas idênticas. Sendo importante referir que muitos dos estudos realizados para dois estágios são facilmente adaptados a mais estágios.

Em relação à função objetivo a mais utilizada é o *makespan*, que é definido como o tempo máximo de conclusão de todas as tarefas. A minimização deste parâmetro normalmente implica uma boa utilização dos recursos, o que se traduz numa acentuada aplicação desta função para os problemas. [38]

Na tabela 3.4 apresenta-se algumas das funções objetivo mais utilizadas assim como alguns exemplos de literatura.

Tabela 3.4: Funções objetivo e alguns exemplos de literatura

Função objetivo	Problema	Literatura
C_{max} tempo de conclusão máximo	$HF2(Rm, Rm)$	[43]
T_{max} máximo atraso	$HFk(Rm, ..., Rm)$	[42]
L_{max} máximo desvio	$HFk(Pm, ..., Pm)$	[4]
\bar{C} média do tempo de conclusão ou tempo total de conclusão	$HF2(Pm, Rm)$	[27]
\bar{C}^w média ponderada do tempo de conclusão ou total da soma ponderada do tempo de conclusão	$HFk(Pm, ..., Pm)$	[30]
\bar{U} número de tarefas em atraso	$HFk(Rm, ..., Rm)$	[42]
\bar{U}^w soma ponderada das tarefas em atraso	$HF3(Qm, Qm, Qm)$	[2]
\bar{T} média do atraso ou atraso total das tarefas	$HF2(Pm, Pm)$	[28]
\bar{T}^w média ponderada dos atrasos ou total da soma ponderada dos atrasos	$HFk(Qm, ..., Qm)$	[46]

De acordo com o método de busca da solução, para os problemas de HFS, o mais utilizado dos algoritmos exatos é o B&B. Contudo, este método mostra-se eficaz para problemas relativamente pequenos. [3] Para problemas maiores é necessário estudar heurísticas, capazes de fornecer boas soluções de forma eficaz.

As heurísticas mais simples utilizadas são “regras de despacho”. Heurísticas como por exemplo SPT³ e EDD⁴ podem de uma forma bastante simples traduzir boas soluções para problemas de minimização de tempos de produção ou número de tarefas em atraso. Heurísticas construtivas como o algoritmo de Johnson também fornecem boas aproximações para listas de prioridades. [20] No âmbito das heurísticas de melhoramento pode-se destacar o algoritmo de *greedy*, método baseado em busca local, que em algumas situações pode-se demonstrar melhor que algumas meta-heurísticas. [47]

Relativamente às meta-heurísticas podemos destacar os AG como dos mais utilizados, seguidos do TS e SA. Podendo referir outras menos utilizadas como por exemplo *Ant Colony Optimization* (ACO), *Artificial Immune Systems* (AIS) e *Neural Networks* (NN). [41]

De referir que foram desenvolvidas intensivas pesquisas sobre o tema HFS onde é possível encontrar mais informação, pode-se destacar os trabalhos de: [31] , [41] e [39].

³SPT - *Shortest Processing Time*

⁴EDD - *Earliest Due Date*

Capítulo 4

Proposta e implementação da solução

Neste capítulo pretende-se apresentar todos os constituintes da solução desenvolvida. Na secção 4.1 é exposto um breve resumo da solução proposta, com as interações do sistema. Posteriormente, são apresentados mais em detalhe, nas secções 4.2, 4.3 e 4.4, os sistemas envolvidos, assim como, na secção 4.5 os algoritmos desenvolvidos.

4.1 Proposta de uma nova solução

Com o objetivo de apresentar uma resposta aos problemas descritos anteriormente, propõem-se o desenvolvimento de uma ferramenta flexível e específica para as necessidades apresentadas. Contudo, não é esperado que esta englobe todas as questões empresariais mas que seja capaz de responder a uma grande parte delas, especialmente nas áreas de produção: corte, cravação e montagem. Sectores estes, que foram identificados pela empresa com intenção de intervenção.

Na figura 4.1 é possível observar as diversas interações do sistema proposto.

A solução proposta é constituída por uma aplicação central desenvolvida em linguagem Visual Basic no software Visual Studio 2012. Esta ferramenta informática é capaz de carregar documentos Excel com as listas de encomendas, para posterior processamento da informação. A utilização do ficheiro Excel prende-se pela atual utilização desta ferramenta para grande parte das tarefas relacionadas com o planeamento. Desta forma, o atual ficheiro para registo de encomendas é totalmente funcional com a ferramenta. Na figura 4.2 é possível observar um ficheiro tipo, com a informação necessária para registo de encomendas. Sendo que apenas o campo relativo à identificação do cliente não é utilizado pela aplicação.

No software Matlab foi desenvolvido um algoritmo *Branch-and-Bound* para planeamento das tarefas nos dois postos de montagem. Sendo que este software é iniciado, executado e terminado pela ferramenta. A ferramenta fornece a informação necessária ao software Matlab e após a execução do algoritmo são retirados os resultados, neste caso o sequenciamento das tarefas.

Contudo, a utilização de um software paralelo para realização dos cálculos demonstrou algumas limitações, nomeadamente o tempo de arranque do software Matlab. Por isto, o algoritmo desenvolvido para planeamento das tarefas nos sectores de corte e cravação,

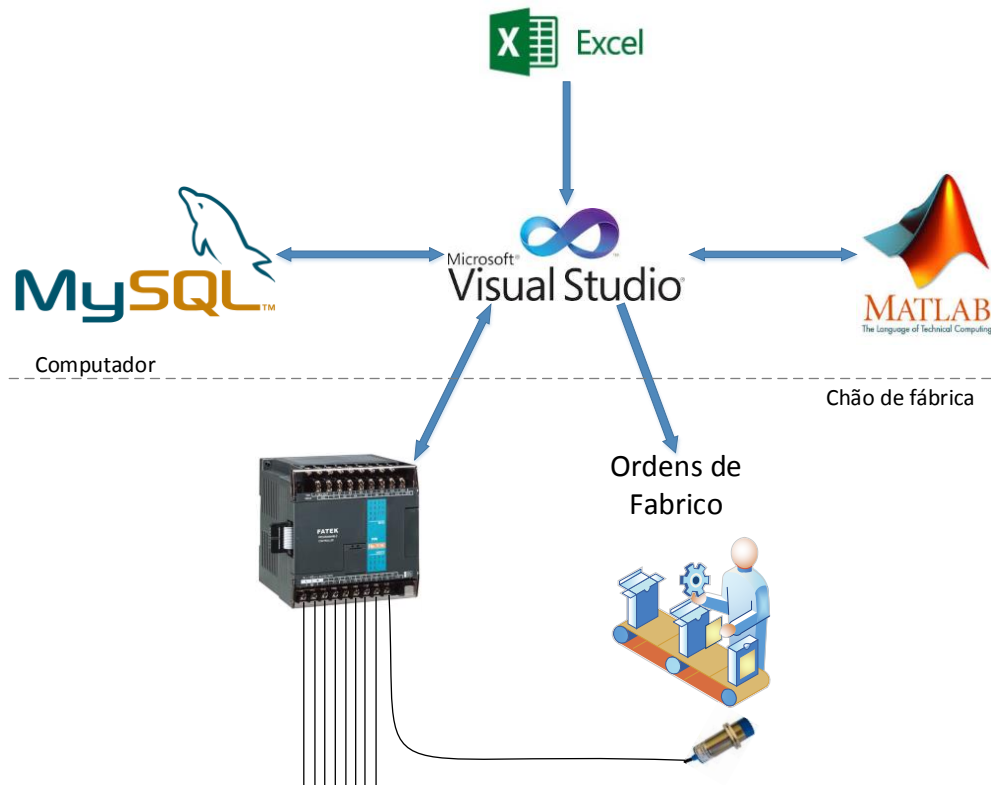


Figura 4.1: Diagrama de interações solução proposta

	A	B	C	D	E
1	Produto	cliente	Quantidade	Data	
2	7715	GNS	500	28-11-2014	
3	7716	UA	1100	25-11-2014	
4	7715	UA	1400	02-12-2014	
5	7716	MEC	400	01-12-2014	
6	7718	UA	900	27-11-2014	
7	7716	GNS	600	01-12-2014	
8	7718	GNS	1500	05-12-2014	
9					

Figura 4.2: Ficheiro Excel com lista de encomendas

foi desenvolvido na própria ferramenta. O algoritmo utilizado para este caso foi um algoritmo genético.

Para gestão de toda a informação foi desenvolvida uma base de dados em MySQL. Esta contém informação essencial para o bom funcionamento da ferramenta. Atualmente, a informação da empresa está dispersa por um conjunto de folhas Excel. Desta forma, utilizando uma base de dados é possível centralizar a informação mantendo-a sempre disponível e atual.

Para aquisição dos dados nos postos de trabalho optou-se por um PLC (*Program-*

mable logic controller), Fatek FBs series, disponível no laboratório do DEM¹. Um PLC é um computador industrial que monitoriza continuamente o estado das suas entradas analógicas e digitais, e atua nas suas saídas com base num programa personalizado. [24] Através deste equipamento, e da conexão de sensores às entradas digitais, é possível obter dados atualizados da produção.

4.2 A Ferramenta

A ferramenta desenvolvida em Visual Basic é constituída por uma janela principal, onde é possível carregar a lista de encomendas em ficheiro Excel através do botão “Carregar encomendas”, como se pode observar na figura 4.3.

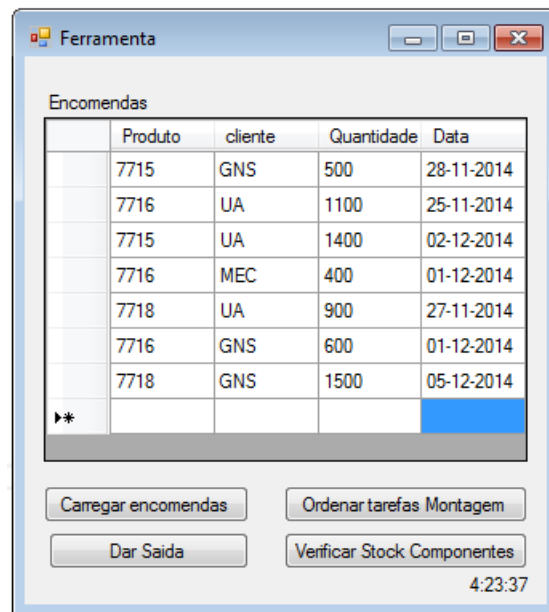


Figura 4.3: Janela inicial da ferramenta

Desta forma, o atual método de registo de encomendas não é alterado.

Após o carregamento da lista de encomendas, se o utilizador desejar, é possível apagar ou adicionar encomendas, ou também alterar qualquer tipo de informação relativa às encomendas carregadas. A partir desta janela, também é possível dar saída de encomendas através do botão “Dar Saída”, ou seja, caso exista o produto requisitado pelo cliente em stock, é possível retirar este da lista de encomendas e atualizar de imediato a quantidade exata em stock. Caso seja feito o pedido de saída e não exista quantidade suficiente desse produto em stock, será mostrado um aviso de que não existe quantidade suficiente para a encomenda requerida. Na figura B.2 em anexo é possível observar esta janela de aviso.

Através do botão “Ordenar tarefas Montagem” é possível efetuar o sequenciamento de tarefas para os dois postos de montagem. Este botão faz ligação a um ficheiro desenvolvido em Matlab onde está o algoritmo *Branch-and-Bound*, abordado na subsecção 4.5.2.

¹DEM - Departamento de Engenharia Mecânica

Como visto anteriormente na análise de produção, secção 2.3, a montagem pode ser considerada um ambiente produtivo *flow shop* de dois estágios, onde apenas as fechaduras com mais que um ponto de fixação passam ao segundo estágio. Tendo em conta também que os dois postos apresentam tempos de montagem semelhantes, ambos a rondar 1 minuto, o segundo posto não se apresenta como gargalo na produção. Por isso, para simplificação do algoritmo, é feito o sequenciamento apenas para o primeiro posto sendo que para o segundo é utilizado o método *FIFO*. Assim, para encomendas de fechaduras com mais que um ponto de fixação, é calculado o instante de tempo necessário para que a tarefa esteja disponível no segundo estágio para cumprir a data de entrega.

O processo inicia-se assim pelo cálculo do tempo útil disponível para todas as tarefas até à data de entrega. Isto é, é calculado o número de horas de trabalho até à data de entrega, considerando 8 horas de trabalho diário e apenas os dias úteis, através da equação 4.1.

$$[T \text{ útil total}] = [\text{dias úteis até data de entrega}] \times [8 \text{ horas diárias}] \quad (4.1)$$

Sendo que para as tarefas que necessitem de realizar alguma operação no segundo estágio é retirado a este tempo útil o tempo de processamento no segundo estágio, obtendo assim o tempo útil para o primeiro estágio, dado pela equação 4.2.

$$[T \text{ útil } 1^{\text{o}}\text{estágio}] = [T \text{ útil total}] - [\text{Tempo Processamento } 2^{\text{o}}\text{estágio}] \quad (4.2)$$

Desta forma, é dado o tempo necessário para que seja efetuada a tarefa no segundo estágio a tempo da data prevista para entrega da encomenda. No caso de encomendas de fechaduras com apenas um ponto de fixação, o tempo útil não sofre qualquer alteração.

De seguida, é calculado o tempo de processamento das encomendas para o primeiro estágio. O tempo de processamento de uma tarefa para um estágio, é dependente da quantidade requerida e a média produtiva (número de componentes produzidos por hora) no respetivo estágio fornecida na base de dados, e é dado em minutos pela equação 4.3.

$$[\text{Tempo Processamento}] = \frac{[\text{Quantidade Requerida}]}{[\text{Média Produtiva}]} \times 60 \quad (4.3)$$

Posteriormente, é possível fornecer ao algoritmo a informação calculada, tempo de processamento e tempo de trabalho disponível até data de entrega, para cada tarefa relativa ao primeiro estágio.

Depois de o algoritmo finalizar a busca da solução é fornecida à aplicação o sequenciamento que apresentou o menor número de tarefas em atraso. Este fornece também um vetor que identifica quais destas tarefas estão em atraso, isto é, com data de conclusão posterior à data de entrega proposta. A ferramenta com esta informação apresenta numa nova janela, apresentada na figura 4.4, uma tabela com o sequenciamento proposto pelo algoritmo, posicionada do lado esquerdo (referente à parte do planeamento). Sendo que as tarefas consideradas em atraso são destacadas a vermelho nesta tabela.

Nesta nova janela é permitida a alteração do sequenciamento proposto pelo algoritmo se o utilizador assim o desejar, através da seleção da linha da tarefa e dos botões “UP” e “DOWN”. De referir que esta alteração do sequenciamento proposto pelo algoritmo, na melhor das hipóteses terá o mesmo número de tarefas em atraso, visto que a solução encontrada pelo algoritmo é a melhor solução encontrada de todas as combinações

Ordens de Fabrico para Montagem

Planeamento

	Produto	cliente	Quantidade	Data	Tempo Processamen
▶	7715	UA	1400	02-12-2014...	47
	7716	UA	1100	25-11-2014...	18
	7718	UA	900	27-11-2014...	15
	7715	GNS	500	28-11-2014...	17
	7716	GNS	600	01-12-2014...	10
	7716	MEC	400	01-12-2014...	7
	7718	GNS	1500	05-12-2014...	25
*					

UP DOWN Refresh Exportar PDF Atribuir Ordenação

Controlo

1º Posto de Montagem

	Tarefa	Quant_nece	Quant_prod	Estado
▶	7715 - UA	1400	0	Em Produ...
	7716 - UA	1100	0	Em Espera
	7718 - UA	900	0	Em Espera
	7715 - GNS	500	0	Em Espera
	7716 - GNS	600	0	Em Espera
	7716 - MEC	400	0	Em Espera
	7718 - GNS	1500	0	Em Espera
*				

2º Posto de Montagem

	Tarefa	Quant_nece	Quant_prod	Estado
▶	7715 - UA	1400	0	Em Espera
	7715 - GNS	500	0	Em Espera
*				

Refresh

Figura 4.4: Janela relativa à montagem

possíveis. Porém esta opção poderá demonstrar-se vantajosa caso o utilizador não pretenda que determinada tarefa fique em atraso em detrimento de outra(s). De referir que também é possível alterar as datas de entrega assim como as quantidades.

Através do botão “Refresh”, presente na janela, a informação é atualizada permitindo assim visualizar os efeitos de alguma alteração feita, através do destaque a vermelho das tarefas em atraso.

Desta forma, à chegada de uma nova encomenda é possível negociar com o cliente, de uma forma mais rápida e precisa, uma data prevista de entrega da encomenda.

Está também disponível a exportação da ordenação para ficheiro pdf para eventual impressão.

Após obtido o sequenciamento das tarefas pretendido é possível atribuir as tarefas aos postos de montagem através do botão “Atribuir Ordenação”. Desta forma será guardada a informação na base de dados.

Na parte de controlo desta janela da montagem visualiza-se duas tabelas relativas aos dois postos de montagem. Nestas tabelas está disponível a informação relativa às tarefas atribuídas a cada posto de montagem, sendo que a ordem de execução das mesmas nos respetivos postos é de cima para baixo. Assim, estas tabelas disponibilizam toda a informação atualizada necessária à produção, como por exemplo: a identificação da tarefa, quantidade a produzir, quantidade produzida até ao momento e o estado da encomenda (“Em Espera”, “Em Produção” ou “Terminada”).

Na janela principal da aplicação através do botão “Verificar Stock Componentes” é possível verificar quais os componentes no stock intermédio que estão a baixo do stock mínimo de segurança. Caso exista uma lista de encomendas carregada os valores das quantidades requeridas são também contabilizados. Através da base de dados é gerada a lista de todos os componentes e toda a matéria-prima requerida para a produção dos produtos encomendados.

Por exemplo, dado um determinado produto final encomendado é gerada uma lista de constituintes² do nível inferior na árvore do produto, o conjunto “*subprodutos 1*”. Desta lista são selecionados os constituintes que apresentam quantidades a baixo do nível mínimo, ou que após retiradas as quantidades necessárias se apresente com stock inferior ao mínimo, gerando o conjunto “*subprodutos 1 falta*”. Através destes subprodutos em

²Estes constituintes podem ser componentes, matéria-prima, ou pequenos conjuntos de componentes montados antes da montagem do produto final.

falta é gerada uma nova lista de constituintes destes do nível inferior os “*subprodutos 2*”, ou seja, os “*subprodutos 2*” contêm todos os constituintes necessários para produzir o conjunto “*subprodutos 1 falta*”. O processo é repetido até chegar a uma lista vazia, isto é, quando o nível mais baixo da árvore de produto é atingida ou as quantidades existentes em “*subprodutos i*” são suficientes para constituir a lista anterior “*subprodutos i – 1 falta*”. A lista de todos os componentes e matéria-prima em falta é então dada pelo somatório de todos os conjuntos de subprodutos em falta calculados.

É importante referir que para o correto cálculo de todos os constituintes necessários é essencial que a informação disponível na base de dados seja rigorosa.

Na secção 4.4 será abordada com maior detalhe a estrutura adotada para a base de dados.

Na figura 4.5 pode-se observar a janela que é aberta após os cálculos de verificação de stock. Na parte superior desta janela é possível observar três tabelas relativas às necessidades calculadas. A tabela da esquerda contém todos os subprodutos requeridos para produção da lista de encomendas carregada, se não tiver sido carregada qualquer lista esta aparece vazia.

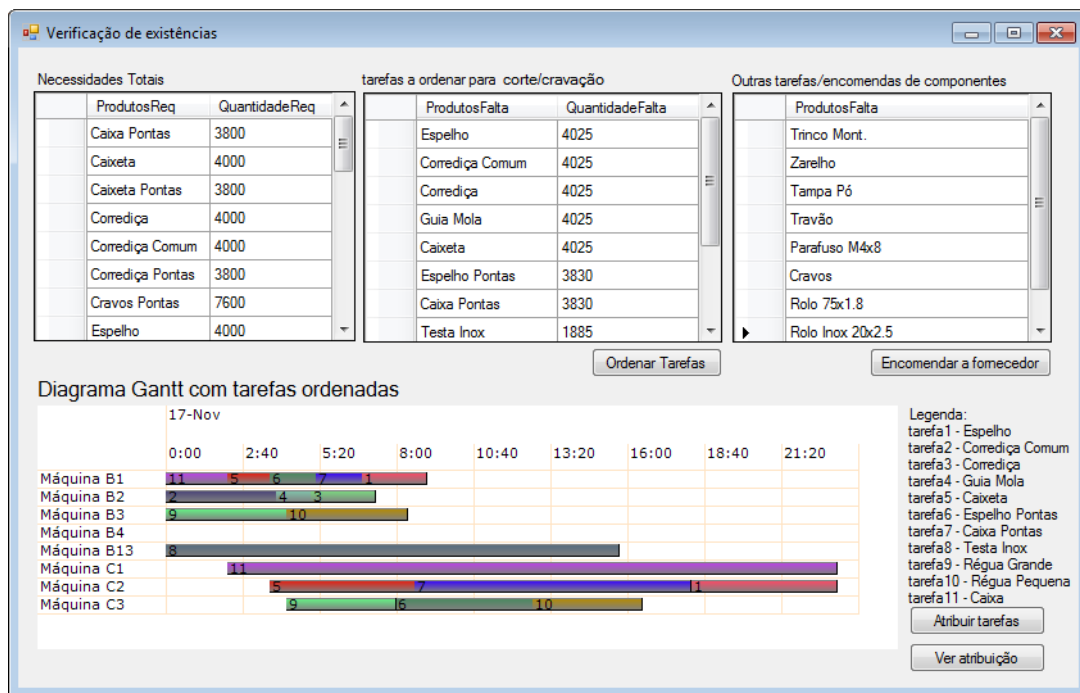


Figura 4.5: Janela relativa à produção

Visto que o âmbito deste trabalho não engloba o fornecimento de matéria-prima e componentes produzidos no sector da injeção, estes são separados dos componentes que realizam algum tipo de operação nos sectores produtivos corte e cravação. Assim sendo, todos os componentes da lista subprodutos em falta que realizam algum tipo de tarefa nos sectores abordados, corte e cravação, são separados para a tabela central. Enquanto que os restantes subprodutos em falta aparecem na tabela da direita.

Através do botão “Ordenar Tarefas” é executado o algoritmo genético abordado na subsecção 4.5.2. Este comando gera uma solução para o sequenciamento das tarefas

existentes para o sector corte e cravação de forma a minimizar o tempo máximo de conclusão. Portanto, este só considera a lista de tarefas existente na tabela central.

A solução obtida é apresentada sob a forma de diagrama de *Gantt* na janela. Optou-se por este método de representação devido à sua grande aplicabilidade em ambientes produtivos e a sua fácil interpretação.

Caso o utilizador não pretenda a solução apresentada é possível correr novamente o algoritmo, onde poderá ser apresentada uma nova solução devido ao carácter aleatório deste algoritmo.

Quando o utilizador pretender atribuir uma solução pode fazer-lo através do comando “Atribuir Tarefas”. Ao clicar neste botão é gravada na base de dados a informação das tarefas alocadas às respetivas máquinas. Através do botão “Ver Atribuição” é aberta uma nova janela, apresentada na figura B.1 em anexo, onde se pode ver separadamente as listas de tarefas associadas a cada uma das máquinas, assim como a informação atualizada relativa ao estado de produção das tarefas.

4.3 Aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados utilizado, como foi referido na secção 4.1, recorre ao uso de sensores e um PLC. Na figura 4.6 encontra-se um esquema representativo do sistema de aquisição de dados proposto.

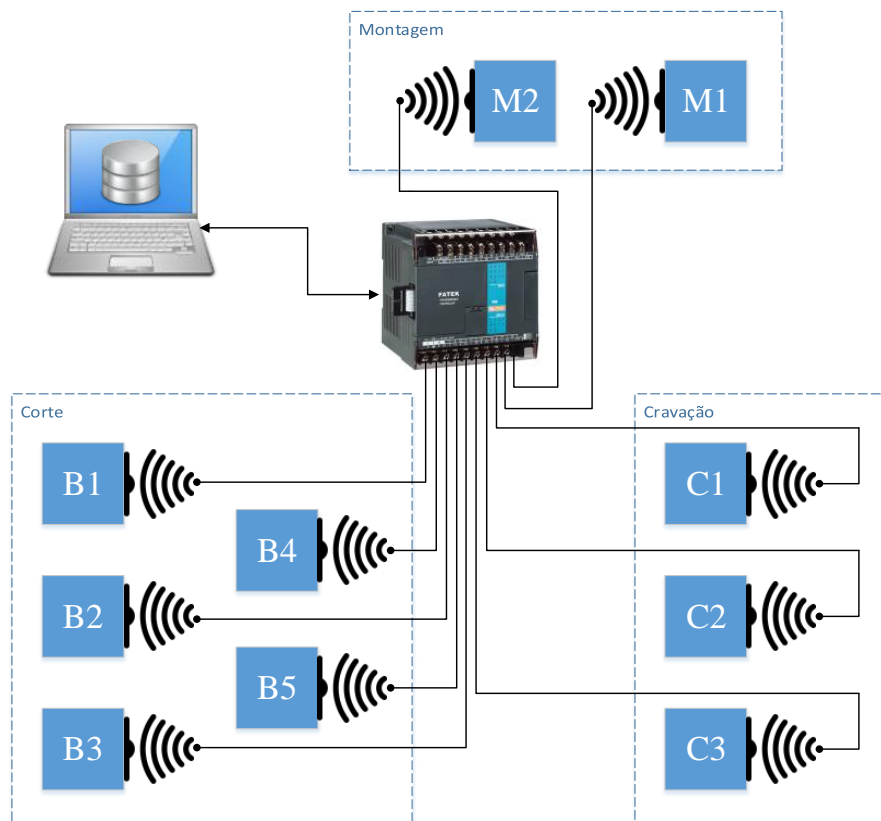


Figura 4.6: Sistema de aquisição de dados proposto

O sistema proposto apresenta um PLC que recebe os sinais elétricos dos 10 sensores conectados às entradas digitais. Estes sensores, de preferência de barreira devido à existência de componentes relativamente pequenos e de frequência de passagem elevada (especialmente no corte), são colocados à saída da máquina como se pode observar na figura 4.7.

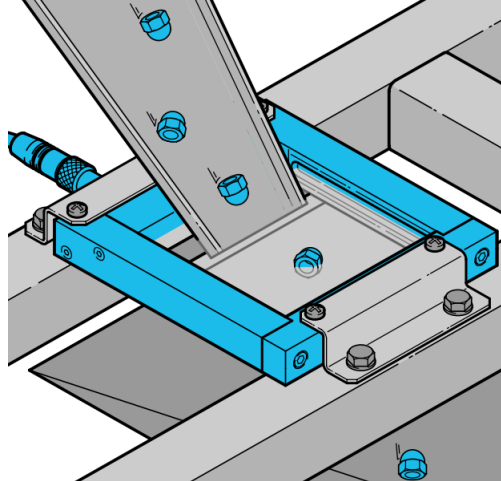


Figura 4.7: Esquema tipo para contagem de peças à saída das máquinas [44]

À passagem de componentes através deste sensor é gerado um impulso elétrico na respetiva entrada digital associada. Desta forma, o PLC ao receber o impulso faz o incremento de uma unidade à posição de memória atribuída para aquela entrada analógica. Na tabela 4.1 é possível observar as correspondências utilizadas.

Tabela 4.1: Correspondências utilizadas na programação do PLC

Estágio	Máquina	Entrada Digital PLC	Memória PLC
Corte	B1	X0	D101
	B2	X1	D102
	B3	X2	D103
	B4	X3	D104
	B5	X4	D105
Cravação	C1	X5	D106
	C2	X6	D107
	C3	X7	D108
Montagem	M1	X8	D109
	M2	X9	D110

A ferramenta desenvolvida estabelece comunicação com o PLC através do Facon Server, conseguindo desta forma atualizar a informação na base de dados. Estabelecida a comunicação, a ferramenta, com uma periodicidade pré-definida, efetua o pedido das posições de memória associado às contagens nas diferentes máquinas. Após isto, é efetuado o acréscimo das quantidades lidas nas tarefas em produção nas respetivas máquinas, e é feito o *reset* da posição de memória.

4.4 Base de dados

A base de dados é um ponto chave no trabalho desenvolvido, é onde está alocada toda a informação para o correto funcionamento do sistema.

Esta base de dados foi desenvolvida através do MySQL Workbench e alojada no computador onde a ferramenta é utilizada. A estrutura utilizada está apresentada na figura 4.8.

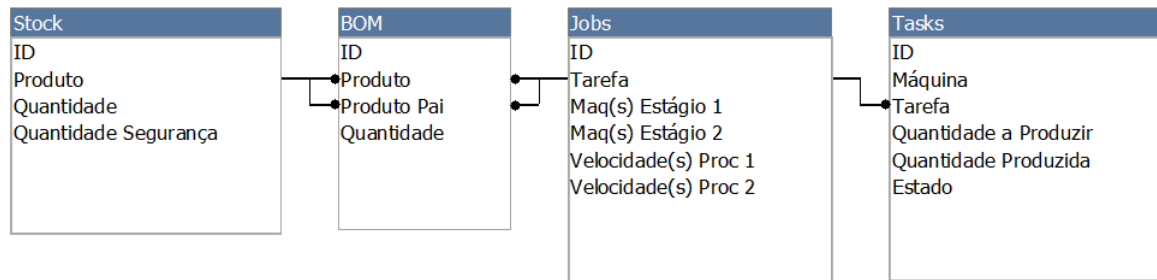


Figura 4.8: Esquema relações BD

Esta é constituída por quatro tabelas:

- “Stock” - Esta tabela contém para todos os produtos, componentes e matéria-prima (registados na coluna “Produto”) as respetivas quantidades existentes (coluna “Quantidades”) e as quantidades mínimas requeridas em stock (coluna “Quantidade Segurança”).

Esta tabela é essencial para verificação dos produtos com quantidades em estado crítico para geração das listas de componentes/produtos a produzir.

- “BOM³” - Esta tabela contém toda a informação relativa à árvore do produto. Para todos os componentes/matéria-prima (na coluna “Produto”) é identificado qual o produto/subproduto que irá ser formado (coluna “Produto Pai”) e qual a quantidade necessária (na coluna “Quantidade”) para o criar.

Através desta tabela é possível calcular todos os constituintes requeridos e respetivas quantidades para um dado produto final encomendado. Processo utilizado para posteriormente verificar a existência dos constituintes requeridos no stock intermédio, e se a quantidade em stock é superior o suficiente, de forma a que após retiradas as quantidades necessárias, a quantidade em stock continue superior à quantidade de segurança.

- “Jobs” - Aqui está contida toda a informação relativa ao processo produtivo nos sectores corte, cravação e montagem. Dada uma tarefa (coluna “Tarefa”), que realiza algum tipo de operação num destes sectores abordados, esta tem associada as máquinas capazes de realizar esta tarefa no primeiro estágio (coluna “Maq(s) Estágio 1”) e as respetivas velocidades de processamento (coluna “Velocidade(s) Proc 1”), e da mesma forma para o segundo estágio, com máquinas capazes (coluna “Maq(s) Estágio 2”) e as respetivas velocidades de processamento de cada máquina

³BOM - *Bill of materials*

(coluna “Velocidade(s) Proc 2”). Estas velocidades são dadas pelo número de peças produzidos por hora.

As máquinas para o primeiro estágio englobam as máquinas de corte (balancés B1, B2, B3, B4 e B5) e primeiro posto de Montagem (M1). As máquinas do segundo estágio compreendem as máquinas de cravação (C1, C2 e C3) e o segundo posto de montagem (M2). Desta forma, a informação é armazenada apenas numa tabela em vez de duas (tabela corte/cravação e tabela de montagem), isto porque ambos tem dois estágios. Caso exista mais que uma máquina capaz de realizar uma tarefa para um mesmo estágio, estas são separadas pelo carácter “;” de forma a separar a informação, assim como as respetivas velocidades de processamento.

- “Tasks” - Por último, nesta tabela ficam registadas todas as tarefas já alocadas às máquinas. Ou seja, para cada máquina (coluna “Máquina”) é possível observar o registo de tarefas (coluna “Tarefa”), assim como a informação relativa à mesma: quantidade requerida (coluna “Quantidade a Produzir”), quantidade atualmente produzida (coluna “Quantidade Produzida”) e o respetivo estado da tarefa (coluna “Estado”).

Através desta tabela e de *queries SQL (Structured Query Language)* é possível visualizar separadamente as tarefas atribuídas a cada máquina.

4.5 Algoritmos para planeamento

Com o intuito de melhorar o planeamento da produção, visto que esta tarefa é executada manualmente e uma única vez por semana, foi decidido a construção de dois algoritmos para a realização desta ação.

A subsecção 4.5.1 é relativa ao planeamento das tarefas associadas aos sectores de corte e cravação onde foi proposto um algoritmo genético.

A subsecção 4.5.2 é relativa ao planeamento das encomendas para os dois postos de montagem onde foi proposto um algoritmo Branch-and-Bound.

4.5.1 Algoritmo Genético

Os sectores de corte e cravação são constituídos por 5 e 3 máquinas, respetivamente. Sendo que a maior parte destas são não relacionadas, devido à diferenciação de tipo de ferramentas utilizadas ou ao tipo de alimentação.

Na figura 4.9 pode-se observar uma lista de possíveis tarefas a executar nestes dois estágios, assim como as respetivas deslocações permitidas.

Os balancés identificados na figura 4.9 por “B1” e “B2” partilham grande parte das tarefas, visto que estas máquinas são ambas de alimentação automática, “B1” de frequência variável e “B2” de frequência fixa. Sendo apenas restringidas algumas tarefas devido à limitação do tamanho das ferramentas de corte utilizadas. As máquinas “B3” e “B4” são máquinas idênticas de alimentação manual. A máquina “B5” é uma máquina usada essencialmente para vazar e carimbar, sendo capaz de realizar ambas as tarefas num único ciclo.

Na cravação as máquinas “C2” e “C3” são consideradas idênticas e “C1” não relacionada.

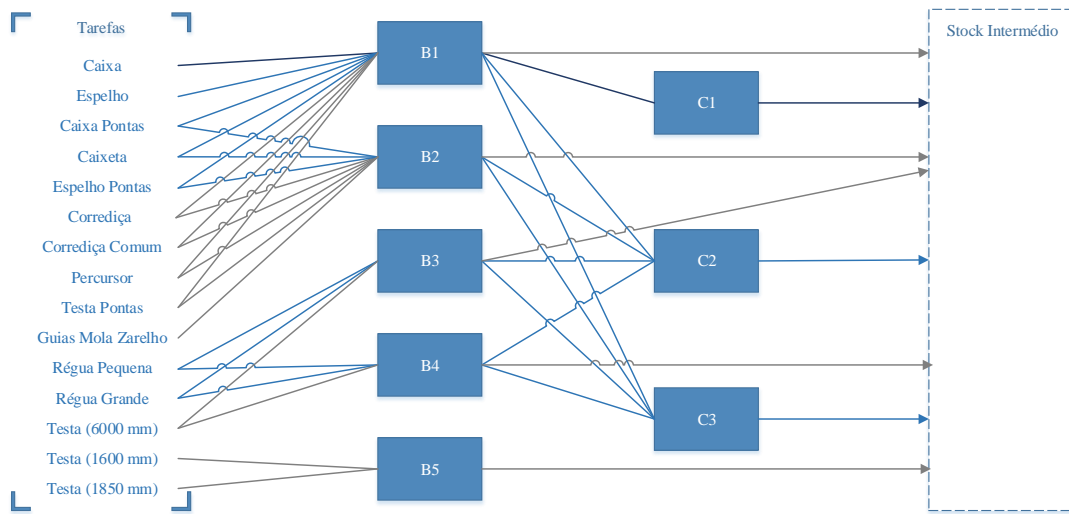


Figura 4.9: Fluxograma deslocações de materiais nos balancês

Dada a configuração dos dois estágios e o sentido unidirecional do fluxo de material chegou-se à conclusão que o problema em questão se trata de um problema de sequenciamento em *Hybrid Flow Shop*. Analisadas as diferenças entre máquinas, estas foram consideradas como não relacionadas para resolução do problema. De referir que esta escolha não apresenta qualquer implicação para máquinas idênticas, uma vez que no caso de uma tarefa apresentar a possibilidade de se realizar em mais que uma máquina de características idênticas, o tempo de processamento será igual em ambas.

A lista de tarefas é constituída por todos os componentes com quantidade atual inferior ao nível mínimo estabelecido na base de dados, ou que ficará em breve a baixo do nível mínimo dados os requisitos das encomendas carregadas. Portanto, é importante disponibilizar todos estes componentes com a maior brevidade possível, por isso foi definido como função objetivo a minimização do *makespan*. O *makespan*, C_{max} , é dado por $\max(C_1, \dots, C_j)$, ou seja, é igual ao tempo de conclusão da última tarefa a ser terminada. Através da escolha desta função, é possível otimizar a utilização dos recursos disponíveis de forma a terminar o conjunto de tarefas no menor espaço de tempo possível, e assim disponibilizar rapidamente o material em falta.

Dada a complexidade do problema considerado de grau de dificuldade $\mathcal{NP-hard}$ por Gupta em [21] optou-se pela utilização de uma meta-heurística, o algoritmo genético. Este método tem sido amplamente utilizado para resolução de problemas deste tipo e com bons resultados, como foi revisto na secção 3.4.

Antes do início do algoritmo é reunida a informação necessária das tarefas a realizar numa matriz. Esta matriz é gerada automaticamente com base na lista de componentes com nível inferior ao mínimo requerido no stock intermédio, respetivas quantidades a produzir e informação disponível na tabela “job” da base de dados (apresentada na tabela C.1 em anexo). Na figura 4.10 é possível observar como exemplo, a informação contida nesta matriz inicial, para uma lista de três tarefas: Caixa, Espelho e Régua Grande, e com as respetivas quantidades a produzir: 800, 500 e 400 unidades.

1	2	3	Tarefa
1	1	3 ; 4	Máq.(s) 1ºEstágio
1	2 ; 3	2 ; 3	Máq.(s) 2ºEstágio
27	17	53 ; 53	Tempo(s) Proc. 1ºEstágio
267	38 ; 38	48 ; 48	Tempo(s) Proc. 2ºEstágio

Figura 4.10: Exemplo de matriz de dados iniciais do AG

O nome das tarefas são convertidas em números inteiros positivos correspondente à posição na lista, ou seja, a primeira tarefa da lista corresponderá à tarefa 1 (Caixa) e assim sucessivamente. E do mesmo modo as máquinas nos estágios corte e cravação, “B1” e “C1” para o valor 1 e assim sucessivamente. Esta codificação é essencial para utilização do AG. Em alguns problemas é optado pela base binária devido à sua estrutura simples, contudo neste caso seria necessário matrizes de dimensão considerável.

Após estar disponível a informação relativa às tarefas é possível dar início ao AG. Na figura 4.11 é esquematizada a estrutura do AG utilizado.

O algoritmo é iniciado pela criação de uma população inicial. Esta população é gerada aleatoriamente, ou seja, é estabelecida uma ordenação aleatória das tarefas existentes. De seguida é completada a informação relativa a cada uma das tarefas, sendo que as tarefas com mais que uma possibilidade de escolha de máquina, é escolhida apenas uma máquina aleatoriamente e o tempo de processamento correspondente.

Este processo é repetido até que a população inicial esteja completa.

Na figura 4.12 é possível observar a estrutura de dados utilizada para guardar a informação do conjunto de indivíduos⁴. Nesta matriz tridimensional é guardada a informação dos i indivíduos constituintes da população. Cada indivíduo é constituído por todas as j tarefas a realizar. Já cada tarefa apresenta a informação relativa à máquina escolhida para o primeiro e segundo estágio, assim como os respetivos tempos de processamento.

Após a criação de todos os indivíduos definidos para a população inicial é efetuado o cálculo da aptidão (também designado por fitness) dos indivíduos. Seguindo a descrição utilizada para o mecanismo de seleção natural de Charles Darwin, sobrevivência do mais apto, este valor da aptidão favorecerá os indivíduos com valor superior na seleção.

Sendo a função objetivo do problema a minimização do *makespan*, o cálculo da aptidão depende do resultado do valor obtido do *makespan* para cada indivíduo.

Assim sendo o algoritmo procede ao cálculo do tempo de conclusão das tarefas não permitindo que tarefas sejam sobrepostas na mesma máquina. Por exemplo, para duas tarefas, $j - 1$ e j , sucessivas na mesma máquina, o tempo início da tarefa j é igual ao tempo de conclusão da tarefa $j - 1$. Para o segundo estágio acresce a esta condição a verificação de conclusão da tarefa no primeiro estágio. Ou seja, o tempo de início da tarefa no segundo estágio será igual ao tempo de conclusão da mesma tarefa no primeiro estágio, caso não existam tarefas a ser executadas nessa máquina do segundo estágio.

Visto que o interesse é que as melhores soluções sejam selecionadas, neste caso as que apresentem menor tempo de conclusão, é usada a equação 4.4 para que as soluções com menor *makespan* apresentem maior valor de aptidão, e as com maior *makespan* menor valor.

⁴Um indivíduo corresponde a uma possível solução do problema, muitas vezes designado também por cromossoma.

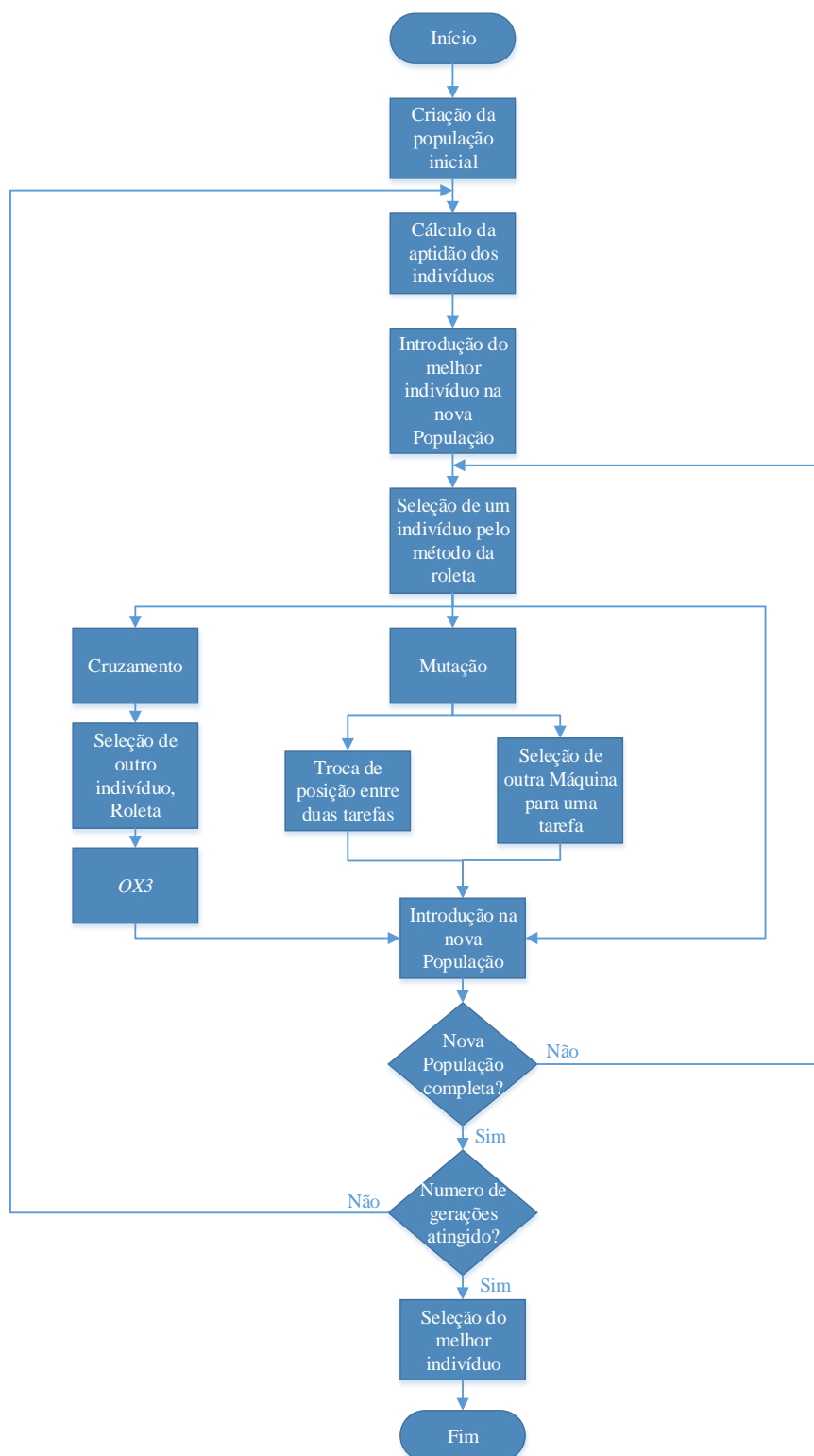


Figura 4.11: Fluxograma do algoritmo genético utilizado

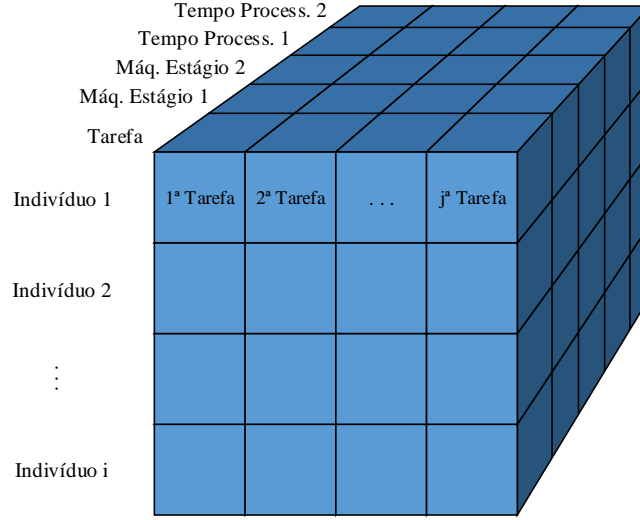


Figura 4.12: Estrutura de dados utilizado no algoritmo genético

$$Fitness(i) = (Max(Makespan) + Min(Makespan)) - Makespan(i) \quad (4.4)$$

Desta forma soluções com o valor máximo de *makespan* (soluções consideradas más) ficam com o valor mínimo da função fitness, e soluções com o valor mínimo de *makespan* (soluções consideradas boas) ficam com o valor máximo da função fitness.

Após a obtenção do valor da aptidão de todos os indivíduos é selecionado automaticamente o melhor indivíduo para a nova população. Desta forma, é garantido que a melhor solução é transferida para a nova população e sem sofrer qualquer alteração. De notar que esta seleção não impede este indivíduo de voltar a ser selecionado, podendo assim sofrer algum tipo de alteração através dos operadores de modificação, cruzamento e mutação.

O método escolhido para seleção dos indivíduos foi o da roleta. Neste método a cada indivíduo é atribuída uma partição da roleta proporcional ao seu índice de aptidão.

Portanto, a probabilidade de um indivíduo, i , numa população de n indivíduos, será dada pela equação 4.5.

$$P(i) = \frac{Fitness(i)}{\sum_{j=1}^n Fitness(i)} \quad (4.5)$$

Assim sendo, a partição na roleta será tanto maior quanto maior for o índice de aptidão. De seguida é gerado um número aleatório no intervalo $[0, 1]$, e escolhido o indivíduo onde este valor se encontre entre o seu valor de probabilidade acumulada e o valor de probabilidade acumulada do indivíduo anterior. Por exemplo, dada uma população constituída por 4 indivíduos e com os resultados de probabilidade representados na tabela 4.2, caso o valor aleatório obtido seja 0.7 será selecionado o indivíduo número 3.

Após a seleção do indivíduo é realizada uma escolha aleatória da operação a realizar, baseada nas probabilidades definidas inicialmente para cada uma. Podendo este sofrer cruzamento com outro indivíduo, mutação ou ser introduzido na nova população sem sofrer qualquer operação.

Tabela 4.2: Exemplo do funcionamento da seleção

Indivíduo	Probabilidade	Prob. Acumulada
1	0.3	0.3
2	0.1	0.4
3	0.4	0.8
4	0.2	1

Caso a operação escolhida seja cruzamento, o método da roleta é executado novamente para escolher o outro indivíduo para o cruzamento de informação. O método adotado para o cruzamento foi uma variante do método *OX* (*Order Crossover*) proposto por Davis em [8] e demonstrado com bons resultados por Cotta em [5] designado por *OX3*.

Dado dois indivíduos selecionados para cruzamento designados por $P1$ e $P2$, por exemplo $P1 = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9]$ e $P2 = [9 \ 3 \ 7 \ 8 \ 2 \ 6 \ 5 \ 1 \ 4]$, e dois números inteiros aleatórios entre 0 e o número de tarefas, por exemplo 3 e 7, são selecionadas as tarefas entre estes dois para criação dos novos indivíduos $F1$ e $F2$. Assim sendo o resultado será $F1 = [_ _ _ 8 \ 2 \ 6 \ 5 _ _]$ e $F2 = [_ _ _ 4 \ 5 \ 6 \ 7 _ _]$.

Para completar os indivíduos gerados de forma a ser obtida uma solução viável são verificadas quais as tarefas que já foram atribuídas aos indivíduos gerados e retiradas dos respectivos indivíduos progenitores. Desta forma, obtém-se para preenchimento do indivíduo $F1$ o seguinte *array*, $[1 _ 3 \ 4 _ _ 7 _ _ 9]$ e para o indivíduo $F2$, $[9 \ 3 _ 8 \ 2 _ _ 1 _]$. De seguida, utilizando estas sequências obtidas são preenchidos os indivíduos $F1$ e $F2$, obtendo os seguintes indivíduos gerados, $F1 = [1 \ 3 \ 4 \ 8 \ 2 \ 6 \ 5 \ 7 \ 9]$ e $F2 = [9 \ 3 \ 8 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 2 \ 1]$.

No caso da mutação esta pode tomar dois tipos diferentes: a permutação da ordem entre duas tarefas desse indivíduo ou escolha de outra máquina para realizar uma tarefa. Desta forma, a atribuição das tarefas às máquinas não fica limitada à concessão feita na geração da população inicial.

Seguidamente, o(s) indivíduo(s) é(são) introduzido(s) na nova população.

Este processo de seleção de indivíduos, para posteriormente sofrerem algum tipo de operação, é repetido o número de vezes necessário para que a nova população tenha o tamanho desejado. Quando a nova população estiver completa e o número de gerações definido ainda não tenha sido atingido é calculada a aptidão de todos os novos indivíduos para posterior seleção para uma nova população. Quando o número de gerações (critério de paragem) for atingido é selecionado da última população o melhor indivíduo. De referir, que é garantido que este é o melhor indivíduo gerado ao longo de todas as gerações, devido à apuração imediata do melhor indivíduo para a seguinte população.

4.5.2 Algoritmo *Branch-and-Bound*

O algoritmo *Branch-and-Bound* (B&B) como foi referido anteriormente foi desenvolvido em Matlab para o sequenciamento das tarefas nos dois postos de montagem. Este é um dos algoritmos exatos mais utilizados em problemas de otimização combinatória.

Este método baseia-se na ideia de desenvolver uma enumeração inteligente dos pontos candidatos à solução ótima inteira do problema. Podendo esta enumeração ser explícita

ou implícita.

O termo *Branch* refere-se ao facto do método efetuar partições no espaço das soluções. O termo *Bound* ressalta que na procura da solução recorre-se à utilização de limites calculados ao longo da enumeração. Um dos pontos fundamentais para o sucesso do B&B é a qualidade dos limites gerados pela solução inteira. Em várias situações, esses limites podem ser alcançados através de procedimentos heurísticos. A qualidade e rapidez do limite alcançado normalmente depende, para cada problema, da estratégia de desdobramento da árvore de busca. Existem basicamente duas grandes estratégias de divisão, busca em profundidade e em largura. [15]

Dado que este algoritmo é para o sequenciamento de tarefas nos postos de montagem, onde as tarefas são geradas pela receção de encomendas sujeitas a datas de entrega, a função objetivo proposta é a minimização do número de tarefas em atraso, dada pela equação:

$$\sum_{i=1}^n U(i) \quad , \quad \text{Onde} \quad U(i) = \begin{cases} 0 & , \text{ se } C(i) \leq d(i) \\ 1 & , \text{ se } C(i) > d(i) \end{cases} \quad (4.6)$$

onde, $d(i)$ é o tempo até à data de entrega da tarefa i , dado pela equação 4.2, e $C(i)$ é o tempo de conclusão da tarefa i dado pela equação:

$$C(i) = C(i - 1) + P(i) \quad (4.7)$$

onde, $P(i)$ é o tempo de processamento da tarefa i , dado pela equação 4.3.

Como explicado na secção 4.2 os dados fornecidos ao algoritmo são apenas relativos ao primeiro estágio de montagem, mais precisamente o tempo de processamento para o primeiro estágio, $P(i)$, e o tempo de trabalho disponível para o primeiro posto até à data de entrega, $d(i)$. Sendo que este apenas efetua o sequenciamento das tarefas para o primeiro posto, para o segundo é utilizado o método *FIFO*.

Desta forma, supondo que não há avarias ou algum tipo de atraso no segundo estágio, as tarefas dadas pelo algoritmo como prontas a tempo para o primeiro estágio também continuam para o segundo estágio, ou seja, ficam concluídas a tempo da data de entrega prevista mesmo após as operações do segundo estágio. Caso o algoritmo não consiga alocar algumas das tarefas a tempo para o primeiro estágio estas vão ser consideradas em atraso também para a data de entrega da encomenda. É importante referir que esta simplificação do problema apenas foi considerada devido ao segundo posto de trabalho estar restringido apenas a uma parte da carga de trabalho e este apresentar tempos de processamento bastante próximos do primeiro estágio.

Dada esta informação como *input*, o algoritmo inicia o processo pela ordenação das tarefas pela data de entrega, isto é, das tarefas com menor tempo para as tarefas com maior tempo disponível para serem executadas. Posteriormente é calculado o número de tarefas em atraso com a ordenação realizada.

Este processo é realizado para definição do limite superior de pesquisa. Ou seja, todas as soluções com número de tarefas em atraso superior ao obtido neste processo são automaticamente “podados”⁵. Sendo que este limite superior é atualizado sempre que é encontrada uma solução melhor, ou seja, o novo limite superior passará a ser igual ao

⁵Utiliza-se “poda” devido à associação da estrutura de estudo de possíveis soluções às ramificações de uma árvore, sendo que soluções podadas correspondem a soluções inviáveis.

número de tarefas em atraso dessa nova solução. Desta forma, o processo de pesquisa de soluções é constantemente otimizado, visto que na construção de uma solução, caso esta apresente valores superiores a este limite, é automaticamente descartada, sem que seja necessário a análise completa da solução.

Já o limite inferior é zero, isto porque na melhor das hipóteses haverá zero tarefas em atraso.

Como exemplo, é possível observar na figura 4.13, parte da árvore pesquisa para um problema de sequenciamento de 4 tarefas com tempos de processamento, $P(i) = [2, 5, 9, 6]$, e o tempo até à entrega, $d(i) = [3, 9, 10, 14]$, tendo sido estas já previamente ordenados pelo algoritmo pela data de entrega.

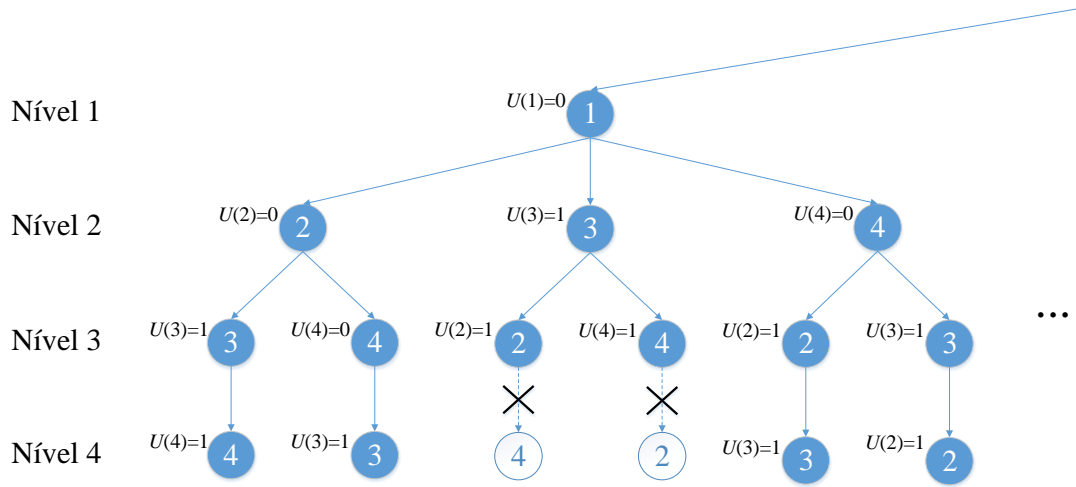


Figura 4.13: Fluxograma exemplo da pesquisa do algoritmo B&B

É importante referir que na figura 4.13 estão apresentadas apenas 6 soluções das 24 existentes para este problema.

A pesquisa é feita em profundidade, ou seja a ramificação inicia-se pelo nível superior através da inserção da tarefa 1 no primeiro nível, seguidamente a tarefa 2 no nível 2, tarefa 3 no nível 3 e por último a tarefa 4 no último nível. Desta forma, obteve-se assim a primeira solução de sequenciamento $[1, 2, 3, 4]$ com duas tarefas terminadas após a data de entrega dadas pela equação 4.6.

A segunda solução será iniciada na tarefa 1, seguida das tarefas 2, 4 e 3. Esta solução apresenta apenas uma tarefa em atraso, logo o limite superior será atualizado para 1.

No caso da terceira solução, esta já não é analisada explicitamente. Ao ser inserida a tarefa 2 no nível 3 é verificado que já existem duas tarefas em atraso, logo, o algoritmo poda a ramificação, esquecendo esta solução. Caso existissem mais derivações após esta tarefa, estas também seriam podadas. O mesmo se verifica para as soluções seguintes.

Caso seja analisada uma solução que tenha o número de tarefas igual ao atual limite superior, a solução só é atualizada caso o somatório dos desvios entre o tempo de conclusão, C , e o tempo até à entrega, d , das n tarefas, seja menor, dado pela equação 4.8.

$$\sum_{i=1}^n |C(i) - d(i)| \tag{4.8}$$

Desta forma, espera-se que através da conciliação destes objetivos as encomendas estejam prontas atempadamente, e que o desvio de tempo entre a data de conclusão e entrega seja o menor possível, com o intuito de minimizar o custo de armazenamento e o custo de renegociação de uma nova data de entrega com cliente.

Capítulo 5

Análise de resultados

Neste capítulo é apresentada uma breve análise e discussão dos resultados obtidos no trabalho desenvolvido. Nas secções 5.1 e 5.2 são analisados os resultados obtidos para os algoritmos desenvolvidos, essencialmente a nível de tempo de cálculo, convergência de resultados e qualidade das soluções. Por fim, na subsecção 5.3 é estabelecida, para um determinado problema, uma comparação entre os resultados obtidos através da ferramenta e pelo atual método utilizado na empresa.

É pertinente referir que a ferramenta desenvolvida foi construída especificamente para um problema real, porém esta é facilmente adaptável a outros tipos de problemas. Na medida em que o algoritmo B&B proposto é capaz de resolver problemas de processadores únicos com o objetivo de minimização do número de tarefas em atraso. Relativamente ao algoritmo genético, este é ajustável a mais estágios e diferentes números de máquinas com algumas modificações a nível de código e atualização da informação na base de dados.

Em relação ao sistema de aquisição de dados esta foi a solução encontrada mais em conta. Na eventualidade de se utilizar consolas gráficas, capazes de efetuar a recolha de dados e de atualizar diretamente a informação na base de dados, este sistema tornaria-se ainda mais fiável e prático. Na medida em que, seria possível observar de imediato no posto de trabalho qualquer alteração realizada no sequenciamento das tarefas para a respetiva máquina.

Os cálculos foram realizados num computador equipado de um processador Intel(R) Core(TM) i5 com 2,40GHz e 4 GB de RAM.

5.1 Algoritmo Genético

Este algoritmo, explicado na subsecção 4.5.1, foi desenvolvido com a finalidade de minimizar o tempo máximo de conclusão das tarefas para os postos de corte e cravação, e apresenta como principais parâmetros de configuração: tamanho da população, número de gerações, taxa de cruzamento e taxa de mutação. De forma a analisar a afetação destes na procura da solução foram realizadas análises de convergência para 20 e 100 tarefas. Assim sendo, foram realizados testes para estes números de tarefas utilizando os valores de 50% e 90% para o cruzamento e os valores de 0.1% e 5% para a mutação, valores referidos próximos dos limites aconselhados pela literatura.

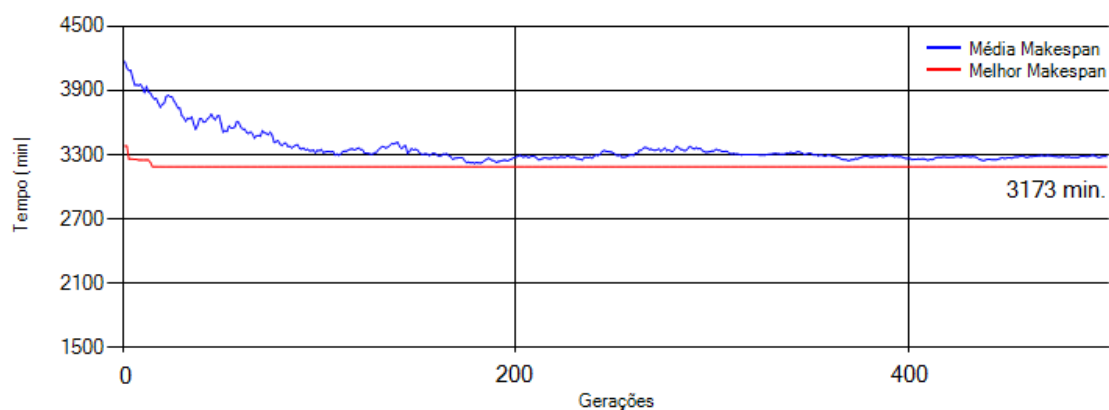


Figura 5.1: 20 tarefas, 100 indivíduos com 50% de cruzamento e 0.1% de mutação

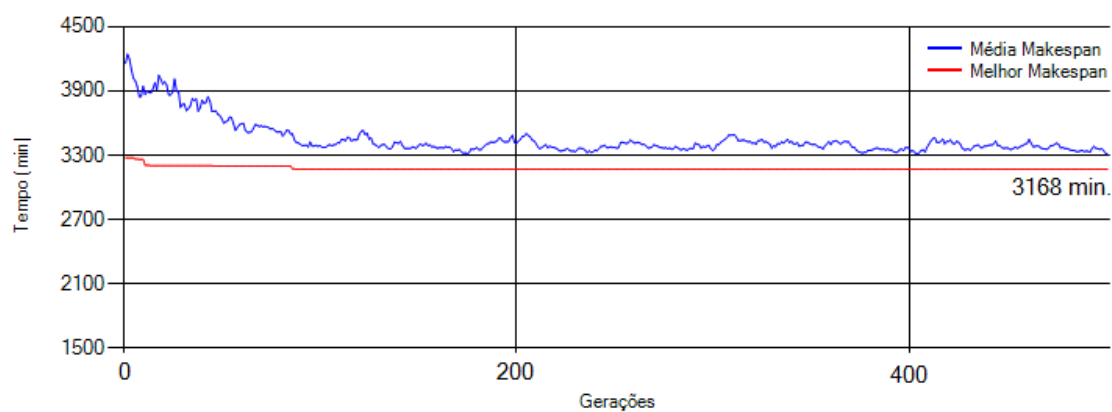


Figura 5.2: 20 tarefas, 100 indivíduos com 50% de cruzamento e 5% de mutação

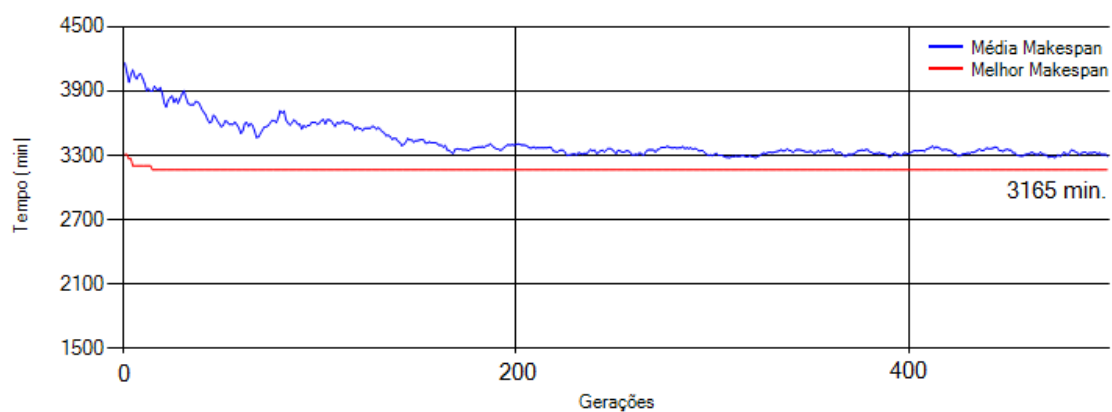


Figura 5.3: 20 tarefas, 100 indivíduos com 90% de cruzamento e 0.1% de mutação

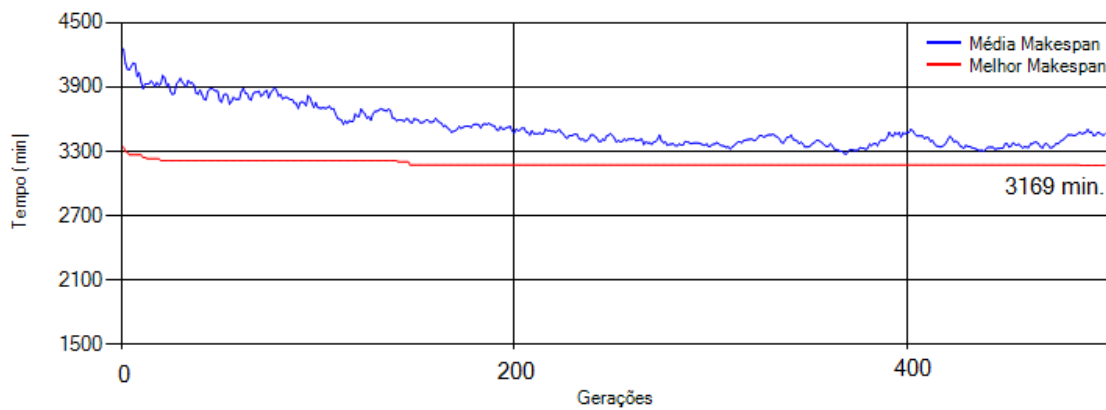


Figura 5.4: 20 tarefas, 100 indivíduos com 90% de cruzamento e 5% de mutação

Para 100 tarefas foi utilizado um número maior de gerações devido ao tempo de convergência ser superior.

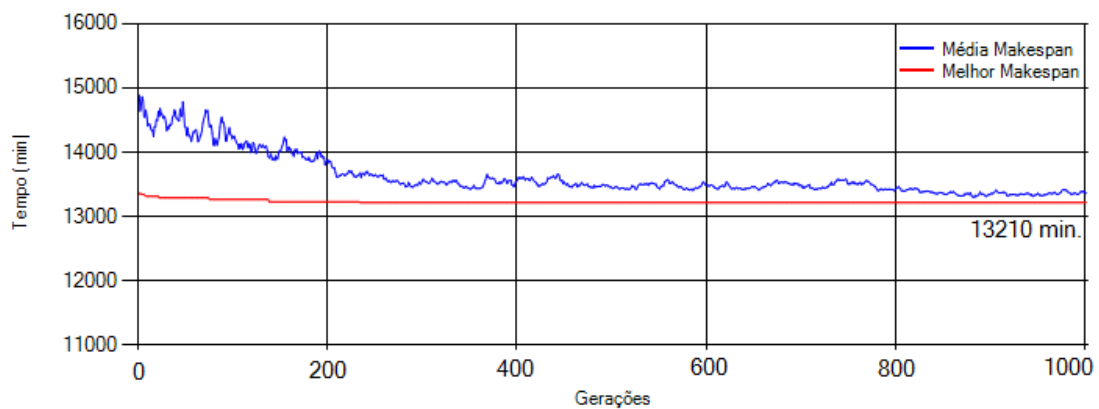


Figura 5.5: 100 tarefas, 100 indivíduos com 50% de cruzamento e 0.1% de mutação

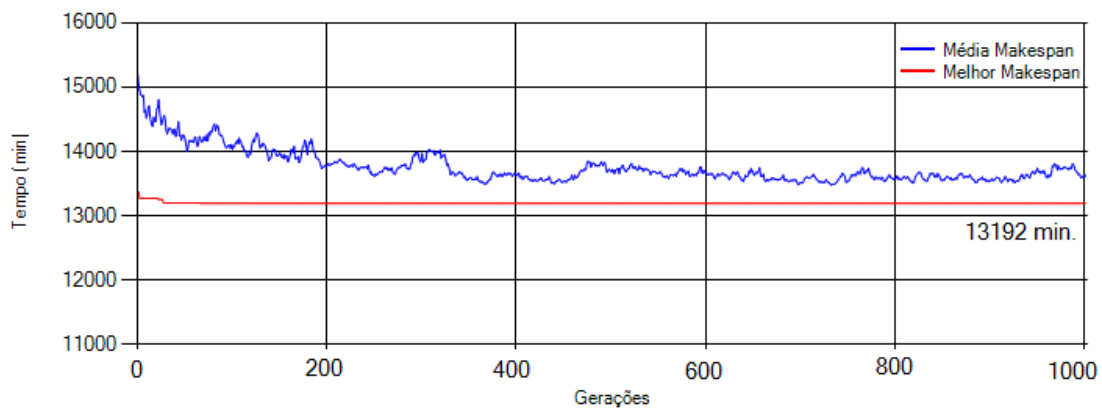


Figura 5.6: 100 tarefas, 100 indivíduos com 50% de cruzamento e 5% de mutação

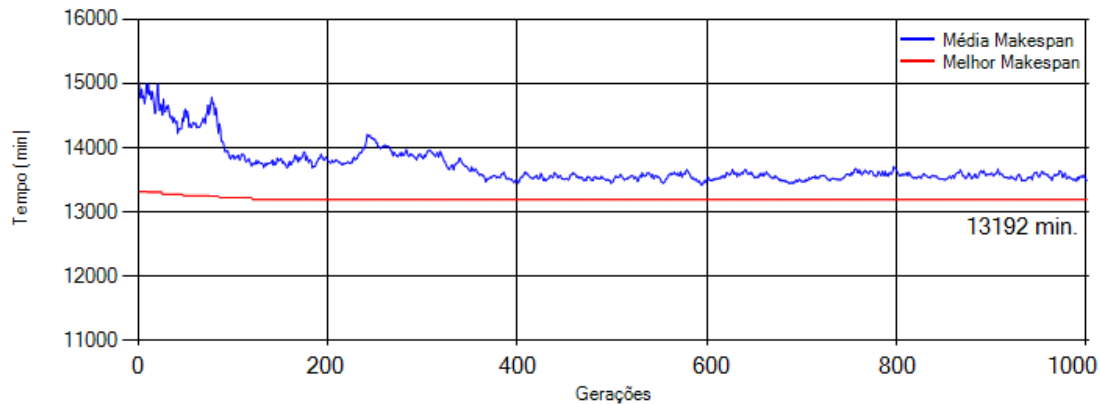


Figura 5.7: 100 tarefas, 100 indivíduos com 90% de cruzamento e 0.1% de mutação

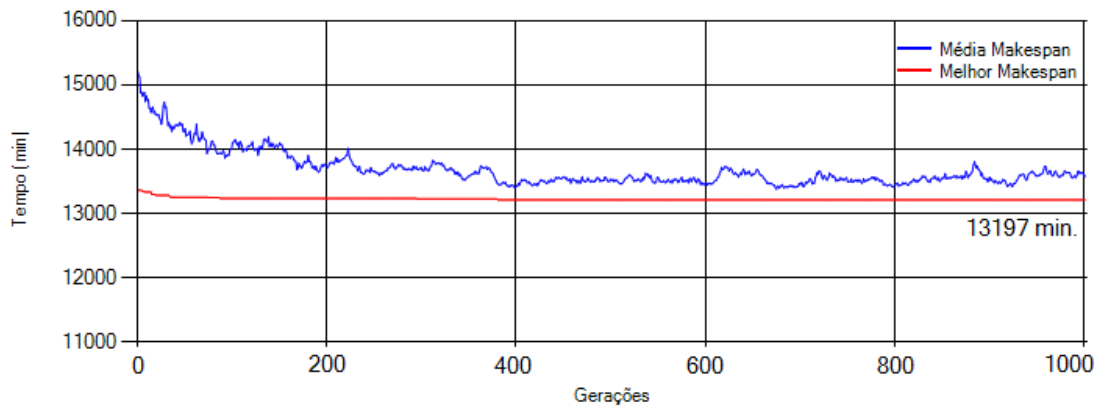


Figura 5.8: 100 tarefas, 100 indivíduos com 90% de cruzamento e 5% de mutação

Após uma análise dos gráficos apresentados é perceptível que os resultados para 20 tarefas apresentam menos oscilações em relação aos resultados para 100 tarefas. Este facto deve-se ao tamanho da população utilizado (100 indivíduos) ser relativamente pequeno para as 100 tarefas, desta forma são abrangidas poucas soluções face às combinações possíveis.

É também possível comprovar que, entre soluções com o mesmo número de tarefas, o aumento da taxa de mutação traduz-se numa maior oscilação da média e um maior desvio em relação ao melhor valor obtido. Da mesma forma, o aumento da taxa de cruzamento provoca algumas variações na média e prolonga o tempo de convergência, como se pode constatar na comparação entre as figuras 5.1 e 5.3, e as figuras 5.2 e 5.4.

Em termos de qualidade de solução, a metodologia que apresenta em geral piores resultados é a combinação da taxa de cruzamento a 50% e de mutação a 0.1%. A utilização destes parâmetros apesar de apresentar valores de média bastante próximas do valor ótimo encontrado e desvios relativamente pequenos, este não encontra soluções melhores devido à fraca variabilidade de soluções.

Com o intuito de verificar o efeito do tamanho da população na busca de soluções, foram realizados testes para o mesmo problema apresentado anteriormente, 100 tarefas, com um tamanho de 500 indivíduos para a população.

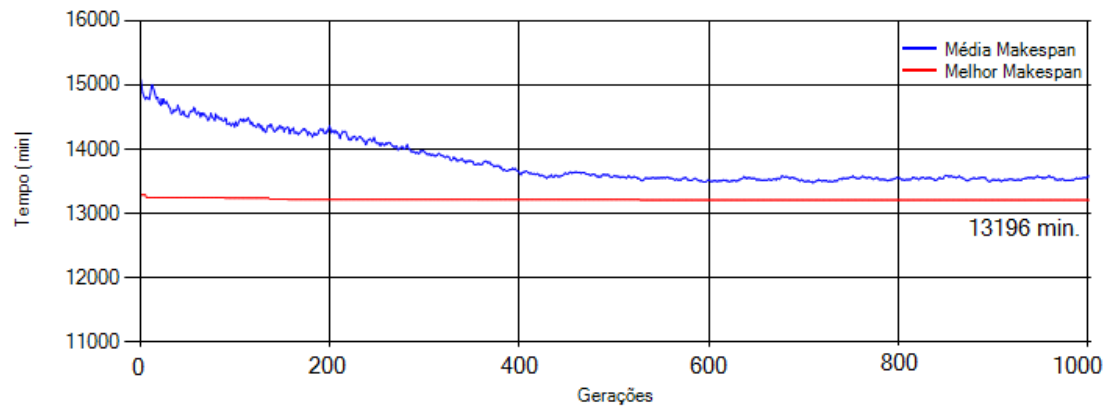


Figura 5.9: 100 tarefas, 500 indivíduos com 50% de cruzamento e 0.1% de mutação

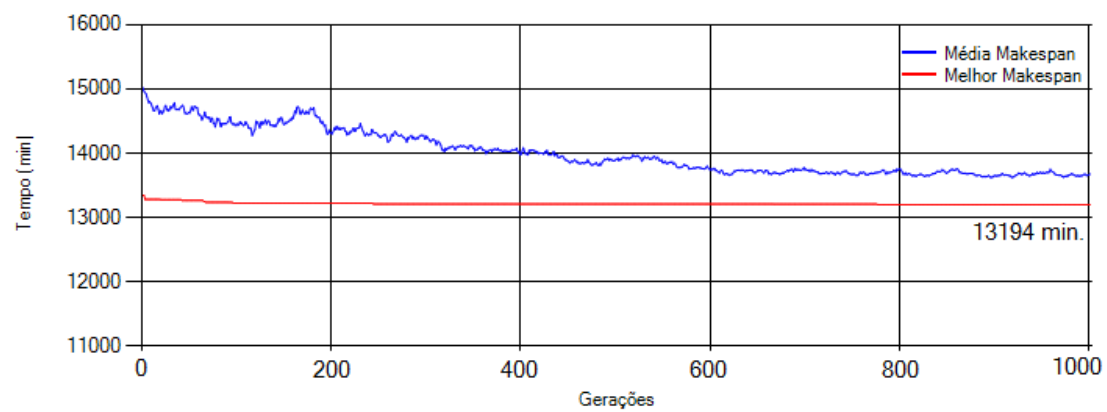


Figura 5.10: 100 tarefas, 500 indivíduos com 50% de cruzamento e 5% de mutação

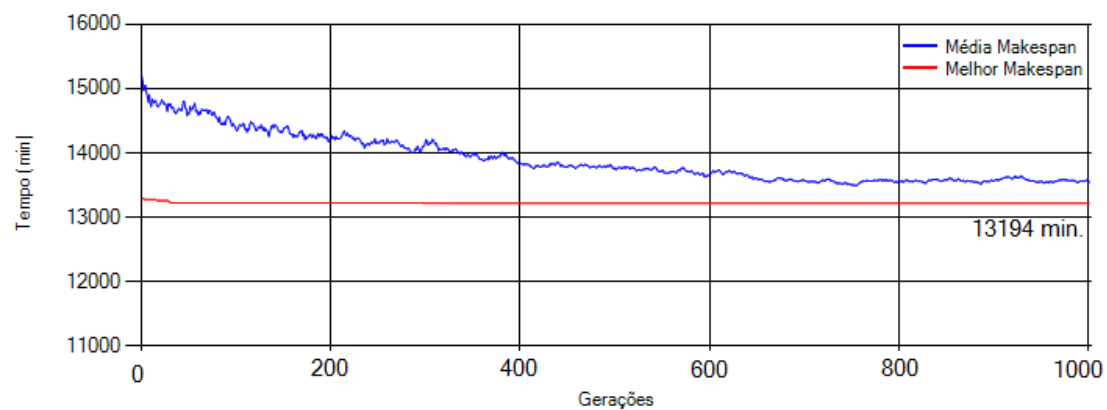


Figura 5.11: 100 tarefas, 500 indivíduos com 90% de cruzamento e 0.1% de mutação

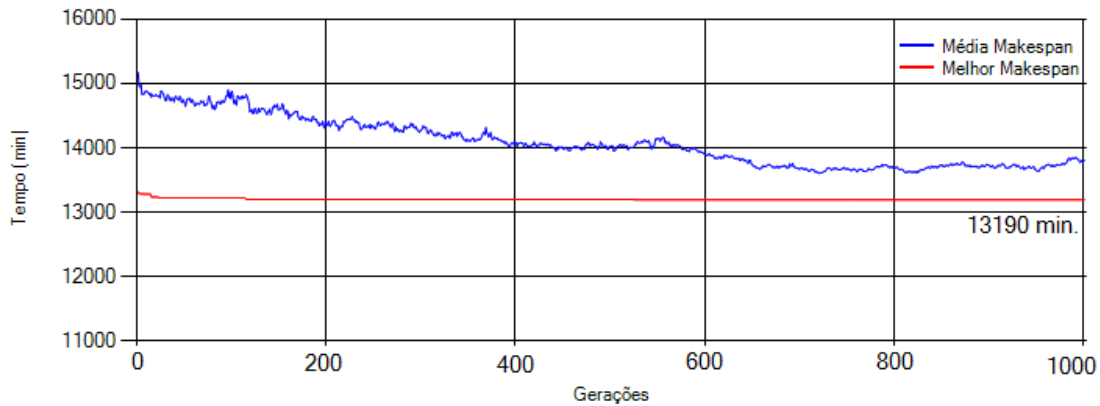


Figura 5.12: 100 tarefas, 500 indivíduos com 90% de cruzamento e 5% de mutação

Pela comparação entre os gráficos obtidos para 500 indivíduos (figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12) e os de 100 indivíduos (figuras 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8) é possível constatar que a média do *makespan* obtida ao longo das gerações apresenta menos oscilações, contudo, esta demora mais tempo a convergir. Este facto deve-se à existência de maior quantidade de valores de *makespan* para cálculo da média, dificultando assim uma variação brusca deste resultado.

Em relação à variação das taxas de cruzamento e mutação os resultados são bastantes semelhantes aos concluídos anteriormente. No que concerne à qualidade da solução encontrada, a utilização de maior número de indivíduos, apresenta em geral melhores soluções, devido ao superior número de soluções analisadas.

Em termos de tempo de processamento, os principais fatores que podem influenciar este parâmetro são a dimensão da população, o número de tarefas e gerações. De forma a analisar o impacto destes em relação ao custo computacional foram analisados os dois problemas, de 20 e 100 tarefas, para diferentes combinações de tamanho da população e de número de gerações. Nas tabelas 5.1 e 5.2 estão apresentados os resultados obtidos para os problemas de 20 e 100 tarefas, respetivamente.

Tabela 5.1: Tempos de cálculo do AG com 20 tarefas

20 tarefas		Gerações	
		500	1000
População	100	1.44 seg.	2.78 seg.
	500	7.62 seg.	15.12 seg.

Tabela 5.2: Tempos de cálculo do AG com 100 tarefas

100 tarefas		Gerações	
		500	1000
População	100	23.54 seg.	46.89 seg.
	500	1 min. e 58 seg.	3 min. e 55 seg.

Como se pode constatar pelos tempos obtidos, este é um processo relativamente rápido face à quantidade de soluções estudadas. Como era esperado, os resultados para

100 tarefas apresentam-se superiores em comparação com os mesmos parâmetros para 20 tarefas. Apesar do número de soluções estudadas ser igual, o tamanho da informação é superior para as 100 tarefas, sendo necessário mais tempo para cálculo dos tempos de conclusão das tarefas.

Em ambos os problemas apresentados, 20 e 100 tarefas, o tempo de processamento é praticamente proporcional, quer face ao aumento de números de gerações, quer ao tamanho da população. Apresentando uma razão de proporcionalidade de 2 para o número de gerações e de 5 para o tamanho da população.

5.2 Algoritmo *Branch-and-Bound*

Como referido anteriormente na subsecção 4.5.2, o algoritmo B&B é um algoritmo exato, e como tal devolve a melhor solução encontrada para o problema. Neste caso o problema visa minimizar o número de tarefas em atraso, e em caso de igualdade deste objetivo entre soluções é escolhida a que apresenta menor desvio entre datas de conclusão e datas de entrega. Portanto, nesta secção pretende-se essencialmente analisar o algoritmo quanto ao tempo de processamento, e não em termos de qualidade da solução, visto que esta é a melhor de todas as soluções possíveis.

Para tal foi definido um máximo de 15 tarefas a analisar. Foi estabelecido este limite dado que o número de encomendas semanais normalmente não ultrapassa este valor para os produtos analisados, e dado os recursos computacionais disponíveis, após este máximo a procura de solução poderia-se tornar inviável por este método.

Para análise foram definidos como parâmetros iniciais o tempo de processamento, P , e o tempo até entrega, d , dados por:

$$P = [5 \ 8 \ 9 \ 7 \ 6 \ 5 \ 11 \ 4 \ 7 \ 9 \ 6 \ 3 \ 4 \ 3 \ 2] \text{ e}$$

$$d = [8 \ 53 \ 32 \ 40 \ 68 \ 27 \ 70 \ 21 \ 75 \ 80 \ 18 \ 57 \ 43 \ 36 \ 17].$$

Sendo que para as análises com menor número de tarefas foram apenas consideradas as iniciais até perfazer o número de tarefas em questão. De seguida apresenta-se na tabela 5.3 um resumo com os tempos de conclusão das tarefas para os diferentes problemas analisados obtidos pelo algoritmo B&B.

Tabela 5.3: Tempos de conclusão obtidos com o algoritmo B&B

	P	5	8	9	7	6	5	11	4	7	9	6	3	4	3	2
	d	8	53	32	40	68	27	70	21	75	80	18	57	43	36	17
C	5 tarefas	5	22	14	29	35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	10 tarefas	5	49	14	30	64	23	41	18	71	58	-	-	-	-	-
	11 tarefas	5	44	29	36	68	16	55	20	62	77	11	-	-	-	-
	12 tarefas	5	44	29	36	64	16	58	20	71	80	11	47	-	-	-
	13 tarefas	5	48	29	36	68	16	62	20	75	84	11	51	40	-	-
	15 tarefas	5	44	89	29	64	22	58	15	71	80	11	47	33	36	17

Na tabela 5.3 estão destacados a vermelho os tempos de conclusão posteriores à data de entrega, ou seja, tarefas classificados em atraso.

De forma a analisar também a potencialidade dos limites utilizados para este método, descritos na subsecção 4.5.2, foi utilizado o algoritmo sem atribuição de limites de viabilidade. Deste modo, foi possível obter o tempo necessário para estudar todas as

soluções possíveis de forma explícita. Na tabela 5.4 são apresentados os tempos obtidos utilizando os dois métodos.

Tabela 5.4: Tempos de processamento obtidos com o algoritmo B&B e enumeração completa

nº tarefas	nº soluções	Tempo algoritmo B&B	Tempo enumeração completa
5	120	0.041 seg.	0.055 seg.
10	3.6×10^6	1.25 seg.	34.29 seg.
11	4.0×10^7	4.42 seg.	6 min. e 25 seg.
12	4.8×10^8	26.97 seg.	1 hora e 22 min.
13	6.2×10^9	14 min. e 23 seg.	18 horas e 21 min.
15	1.3×10^{12}	6 horas e 52 min.	Não Calculado

Como se pode constatar pelos valores obtidos, existe uma diferença significativa entre o tempo de processamento do algoritmo B&B utilizado e o tempo que seria necessário para uma análise extensiva de todas as soluções. Sendo as soluções apresentadas por ambos os métodos iguais, visto que ambos tem a mesma função objetivo, diferenciando-se apenas no método de análise. O algoritmo B&B analisa implicitamente as soluções enquanto que a enumeração completa efetua uma análise explícita de todas as soluções.

Em termos percentuais a maior variação de tempo de cálculo do algoritmo B&B ocorre do número de tarefas 12 para o 13. Este facto é explicado pelo aumento do número de tarefas em atraso. Como referido anteriormente, este limite superior do algoritmo é dado pelo número de tarefas em atraso da melhor solução encontrada até ao momento. Portanto, dados dois problemas com o mesmo número de tarefas, o que apresentar um maior limite superior ou demorar mais tempo a atingir o mesmo limite, irá apresentar maior tempo de processamento. Isto porque com um limite superior mais elevado são estudadas mais soluções, ou na melhor das hipóteses são analisadas implicitamente até a um nível inferior da árvore de pesquisa.

Em termos comparativos, se a data de entrega da tarefa em atraso no problema apresentado com 13 tarefas fosse alterada para 84, o tempo de processamento passaria a ser de 2 minutos e 5 segundos.

Em resumo, o algoritmo desenvolvido apresenta bons resultados, na medida em que é possível obter uma solução exata num tempo substancialmente inferior. Contudo, pode ainda assim apresentar algumas limitações caso o número de tarefas seja elevado e algumas destas estejam em atraso.

Como forma de minimizar o tempo de cálculo, caso o número de encomendas seja elevado e se assim for possível, as soluções poderão passar por: união de tarefas com o mesmo produto e datas iguais; exclusão de tarefas com data de entrega distante ou de pequenas quantidades (caso seja possível retirar do stock de produto acabado e repor em alturas de menor carga); ou imposição de um critério de paragem ao algoritmo baseado no tempo de processamento (porém, neste caso a solução ótima poderá não ser alcançada).

5.3 Comparação com o planeamento existente

Com o intuito de realizar uma comparação com o sistema atual existente na empresa, e dado que não foi possível implementar a solução devido ao tempo disponível, foi proposta

uma lista de encomendas e tarefas ao responsável pelo planeamento da produção. Esta lista engloba portanto apenas três fechaduras abordadas por este trabalho e os respetivos constituintes.

Na tabela 5.5 são apresentadas as tarefas com respetivas quantidades a realizar no corte e cravação, assim como as máquinas e prioridades atribuídas pelo responsável do planeamento. Foram dadas prioridades diferentes às tarefas que realizam operações nas mesmas máquinas de corte de forma a estabelecer uma ordem de produção. No estágio de corte a sequência é estabelecida pela regra *FIFO*.

Tabela 5.5: Lista de tarefas com prioridades atribuídas pela empresa

	Tarefas	Quantidade	Corte (prioridade)	Cravação
1	Espelho	6000	B1 (2)	C2
2	Corrediça Comum	5000	B1 (4)	-
3	Corrediça	7500	B1 (3)	-
4	Guia Mola	3000	B2 (4)	-
5	Caixeta	2500	B2 (3)	C3
6	Espelho Pontas	8000	B2 (1)	C2
7	Caixa Pontas	4500	B2 (2)	C2
8	Testa Inox	1500	B13 (1)	-
9	Régua Grande	3800	B3 (1)	C3
10	Régua Pequena	3300	B3 (2)	C3
11	Caixa	3000	B1 (1)	C1

Dada esta informação foram calculados os tempos de produção para cálculo do *makespan*. Na figura 5.13 é apresentado o diagrama de Gantt desta solução proposta de forma a ter melhor perceção dos tempos produtivos.

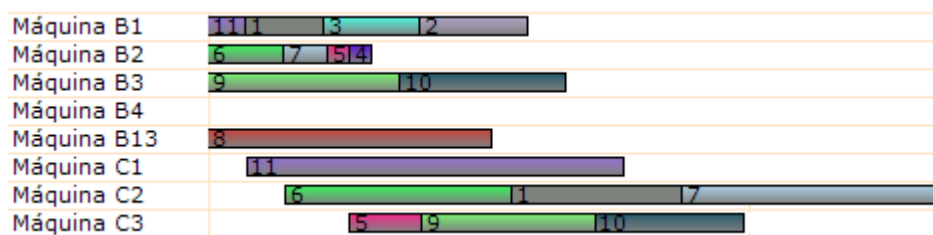


Figura 5.13: Diagrama de *Gantt* da solução apresentada pela empresa

Para esta solução foi obtido um tempo máximo de conclusão de 32 horas e 5 minutos. Valor obtido através do somatório dos tempos de processamento da tarefa 6 nos dois estágios, e as tarefas 1 e 7 no segundo estágio. Para cálculo de cada um dos tempos foram utilizados os valores das médias produtivas guardados na base de dados, podendo ser consultados em anexo na tabela C.1.

De seguida, foi testado o algoritmo genético para as mesmas tarefas e quantidades, para possível comparação, do qual se obteve a solução apresentada na figura 5.14.

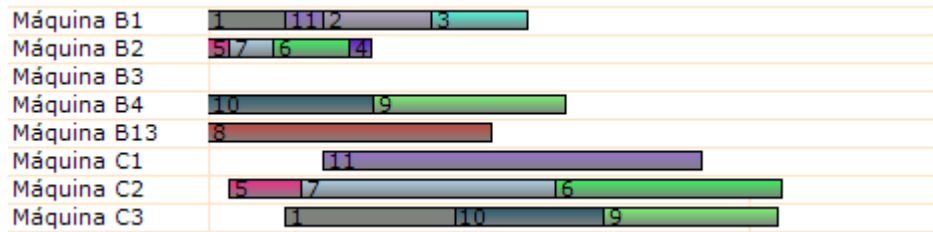


Figura 5.14: Diagrama de *Gantt* da solução apresentada pelo AG

Nesta solução foi obtido um tempo máximo de conclusão de 25 horas e 18 minutos. Neste caso, o valor corresponde ao somatório do tempo total de processamento da tarefa 5 e os tempos de processamento no segundo estágio das tarefas 6 e 7.

Desta forma, obteve-se uma diferença de 6 horas e 47 minutos, entre a solução proposta pela empresa e pela ferramenta desenvolvida.

Poderia-se obter uma diferença maior entre os resultados obtidos caso os tempos de processamento entre o primeiro e segundo estágio fossem semelhantes. A cravação desta forma é vista como um gargalo na produção tendo por vezes várias tarefas à espera antes da primeira tarefa ser terminada neste posto, não havendo praticamente possibilidade de haver um intervalo entre tarefas. Caso a capacidade produtiva fosse aumentada nos postos de cravação o responsável pelo planeamento teria que ter atenção redobrada para que não acontecesse tempos de espera significativos neste estágio.

Para os postos de montagem, à semelhança do procedimento usado anteriormente para o corte e cravação, foi proposta uma lista de encomendas com respetivas quantidades e datas de entrega, apresentada na tabela 5.6. Nesta tabela é também visível a prioridade atribuída a cada uma das encomendas pelo responsável. Esta ordem é relativa ao primeiro posto de montagem, sendo que encomendas de fechaduras que realizam operação no segundo posto (fechaduras de três pontos: 7715 e 7717) são ordenadas no segundo posto pela metodologia *FIFO*.

Tabela 5.6: Lista de encomendas e prioridades dadas pela empresa

Produto	Cliente	Quantidade	Data de Entrega	Prioridade
7715	A	720	27-11-2014	1
7716	B	360	25-11-2014	7
7715	C	720	02-12-2014	3
7716	D	380	01-12-2014	4
7717	E	480	28-11-2014	2
7716	F	600	02-12-2014	5
7717	G	240	26-11-2014	8
7716	H	520	03-12-2014	6

Para verificar quais as tarefas em atraso, foi calculado para cada uma o tempo de processamento e o tempo disponível para o primeiro posto dado pela equação 5.2. Como referido na secção 4.2 os cálculos são feitos apenas para o primeiro posto, visto que o segundo posto não é um gargalo na produção. Foi considerado que o início da produção seria dia 24-11-2014, e que as encomendas devem estar prontas no início do dia da data de

entrega. Os resultados obtidos para o planeamento efetuado pelo responsável da empresa são apresentados na tabela 5.7 por ordem de prioridade.

Tabela 5.7: Resultados obtidos para o planeamento das encomendas dado pela empresa

Produto	Cliente	Quant.	Tempo até entrega [h]	Tempo proc. 1ºPosto [h]	Tempo útil 1ºPosto [h]	Tempo conc. 1ºPosto [h]
7715	A	720	24	12	12	12
7717	E	480	32	8	24	20
7715	C	720	48	12	36	32
7716	D	380	40	6.33	40	38
7716	F	600	48	10	48	48
7716	H	520	56	8.67	56	57
7716	B	360	8	6	8	63
7717	G	240	16	4	12	67

Com este sequenciamento, como é possível comprovar pelos tempos de conclusão e os tempos disponíveis para término no primeiro posto, as últimas duas tarefas não vão ser concluídas a tempo para a data de entrega, sendo que a encomenda do cliente “H” apresenta um atraso de uma hora. Na figura 5.15 é apresentada esta solução através da ferramenta, visto que o utilizador tem possibilidade de alterar o planeamento e verificar as tarefas em atraso.

	Produto	cliente	Quantidade	Data	Tempo Processamen
	7715	A	720	27-11-2014...	24
	7717	E	480	28-11-2014...	16
	7715	C	720	02-12-2014...	24
	7716	D	380	01-12-2014...	6
	7716	F	600	02-12-2014...	10
	7716	H	520	03-12-2014...	9
	7716	B	360	25-11-2014...	6
	7717	G	240	26-11-2014...	8

Figura 5.15: Janela da solução apresentada pela empresa

Como a ferramenta apenas verifica se o tempo de conclusão é posterior à data de entrega, as três últimas encomendas são consideradas como em atraso.

A solução proposta pela ferramenta, dada pelo algoritmo B&B, é apresentada na figura 5.16. Na tabela 5.8 são apresentados os tempos obtidos para esta solução.

	Produto	cliente	Quantidade	Data	Tempo Processamen
	7716	B	360	25-11-2014...	6
	7717	G	240	26-11-2014...	8
	7717	E	480	28-11-2014...	16
	7715	C	720	02-12-2014...	24
	7716	D	380	01-12-2014...	6
	7716	F	600	02-12-2014...	10
	7716	H	520	03-12-2014...	9
	7715	A	720	27-11-2014...	24

Figura 5.16: Janela da solução apresentada pelo algoritmo B&B

Tabela 5.8: Resultados obtidos para o planeamento das encomendas dado pela ferramenta

Produto	Cliente	Quant.	Tempo até entrega [h]	Tempo proc. 1ºPosto [h]	Tempo útil 1ºPosto [h]	Tempo conc. 1ºPosto [h]
7716	B	360	8	6	8	6
7717	G	240	16	4	12	10
7717	E	480	32	8	24	18
7715	C	720	48	12	36	30
7716	D	380	40	6.33	40	36
7716	F	600	48	10	48	46
7716	H	520	56	8.67	56	55
7715	A	720	24	12	12	67

Como é possível comprovar pela tabela 5.8 e pela figura 5.16 a única tarefa em atraso é a última tarefa. Esta solução foi obtida pelo algoritmo em 0.306 segundos, porém devido ao tempo de arranque do software Matlab a solução demora mais 1 a 2 minutos a estar visível na aplicação.

É importante referir que nem sempre o menor número de tarefas em atraso traduz vantagem económica à empresa. Contudo, foi definido este objetivo de forma a minimizar o número de tarefas afetadas de forma a evitar a consequente renegociação da encomenda com o cliente, evitando assim contrapartidas e insatisfação dos clientes. Contudo, a ferramenta proposta proporciona ao utilizador a possibilidade de alterar a solução proposta, podendo desta forma dar privilégio a outro critério.

Capítulo 6

Conclusões e trabalho futuro

Este projeto mostrou-se um desafio bastante aliciante, na medida em que foi baseado na proposta de resolução de um problema real. Proporcionando desta forma uma motivação adicional para apresentação de uma solução viável.

Através deste trabalho, foi assim possível estabelecer uma ligação entre conhecimentos desenvolvidos durante o percurso académico e o mundo empresarial.

O sistema desenvolvido apresenta-se como uma solução abrangente, na medida em que através deste é possível a inserção de encomendas e gestão de existências na produção, englobando também o planeamento de tarefas.

A ferramenta apresenta-se bastante flexível, ao contrário de alguns softwares referenciados no trabalho, na medida em que proporciona ao utilizador a decisão final sobre o sequenciamento de tarefas a adotar.

Este sistema para além de apresentar como principal vantagem a otimização e automatização de processos, até ao momento efetuados manualmente, apresenta-se como solução rápida e simples para apoio à decisão, visto que o sistema concede a visualização prévia de eventuais sequenciamentos.

Após a adoção do sistema, a empresa passa assim a disponibilizar de uma metodologia mais rápida e menos dispendiosa em relação ao controlo de existências, na medida em que deixa de ser necessário recorrer à contagem manual de peças ou a utilização de estimativas para as quantidades.

Em relação à metodologia utilizada para obtenção de soluções de sequenciamento, através dos algoritmos desenvolvidos, esta apresentou em geral bons resultados. Em comparação com o modo atual de sequenciamento, o sistema proposto é capaz de gerar soluções melhores, e de uma forma mais rápida, autónoma e baixa probabilidade de erro. Reduzindo também o esforço despendido nas funções de sequenciamento atual.

O desenvolvimento deste trabalho permitiu aprofundar, de uma forma significativa, os conhecimentos a nível de programação em visual basic, base de dados, gestão de operações e automação, e ao mesmo tempo adquirir conhecimentos em áreas pouco desenvolvidos ao longo do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, em especial na otimização.

Tendo em conta que existem algumas vertentes que não foram exploradas, propõem-se como possíveis trabalhos futuros:

- melhoramento gráfico da ferramenta;

- adicionar funcionalidades extra, como por exemplo gestão da base de dados a partir da ferramenta;
- aplicar o algoritmo B&B diretamente na ferramenta;
- comparação dos resultados obtidos pelos algoritmos desenvolvidos, com outros algoritmos e/ou com os próprios desenvolvidos através da adaptação das funções objetivo;
- englobar uma gama mais diversificada de produtos, através da introdução da informação na base de dados;
- implementação de consolas gráficas para verificação da lista de tarefas em cada máquina;
- implementação do sistema na empresa.

Bibliografia

- [1] Emerson Alecrim. O que é erp (enterprise resource planning)? [Acedido em 7 de Abril de 2014]. Disponível em <http://www.infowester.com/erp.php>.
- [2] S. Bertel and J.-C. Billaut. A genetic algorithm for an industrial multiprocessor flow shop scheduling problem with recirculation. *European Journal of Operational Research*, 159(3):651–662, December 2004.
- [3] A. Bolat, I. Al-Harkan, and B. Al-Harbi. Flow-shop scheduling for three serial stations with the last two duplicate. *Computers and Operations Research*, 32(3):647–667, 2005.
- [4] Valérie Botta-Genoulaz. Hybrid flow shop scheduling with precedence constraints and time lags to minimize maximum lateness. *International Journal of Production Economics*, 64(1-3):101–111, March 2000.
- [5] Cotta C. and Troya J. M. Genetic forma recombination in permutation flowshop problems. *Evolutionary Computation*, 6(1):25–44, 1998.
- [6] CAMSTAR. Manufacturing shop floor control. [Acedido em 2 de Abril de 2014]. Disponível em <http://www.camstar.com/resources/glossary/shop-floor-control/>.
- [7] Reeves Colin R., editor. *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*. McGraw-Hill Book Company Europe, London, 1995.
- [8] L. Davis, editor. *Handbook of Genetic Algorithms*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.
- [9] Housni Djellab and Khaled Djellab. Preemptive Hybrid Flowshop Scheduling problem of interval orders. *European Journal of Operational Research*, 137(1):37–49, February 2002.
- [10] S. E. Elmaghraby and R. E. Karnoub. *Production control in hybrid flowshops: an example from textile manufacturing*. In *The Planning and Scheduling of Production Systems*. Springer US, Massachusetts: Boston, 1996.
- [11] Filipe Fernandes. Análise e projeto de um sistema de apoio ao planeamento de encomendas. Relatório de Projecto. Universidade de Aveiro, 2012. Disponível em <http://ria.ua.pt/handle/10773/10427>.
- [12] GNS. Acessórios. [Acedido em 6 de Março de 2014]. Disponível em <http://www.ingns.com/index.php/pt/produtos/acessorios>.

-
- [13] GNS. Fechaduras. [Acedido em 4 de Março de 2014]. Disponível em <http://www.ingns.com/index.php/pt/produtos/fechaduras>.
- [14] GNS. Quem somos. [Acedido em 28 de Fevereiro de 2014]. Disponível em <http://www.ingns.com/index.php/pt/empresa/quem-somos>.
- [15] M.C. Goldbarg and H.P.L. Luna. *Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos*. CAMPUS - RJ, Rio Janeiro, 2005.
- [16] Jozef Grabowski and Jaroslaw Pempera. Sequencing of jobs in some production system. *European Journal of Operational Research*, 125(3):535–550, September 2000.
- [17] Stephen C. Graves. Manufacturing planning and control. [Acedido em 25 de Março de 2014]. Disponível em <http://web.mit.edu/sgraves/www/ProdPlanCh.PDF>.
- [18] Jorge Guedes. Planeamento e controlo de produção na euronete, s.a. Tese de mestrado integrado. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2010. Disponível em <http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/59820>.
- [19] A. Guinet. Textile Production Systems: a Succession of Non-identical Parallel Processor Shops. *Journal of the Operational Research Society*, 42(8):655–671, August 1991.
- [20] A. Guinet, M.M. Solomon, P.K. Kedia, and A. Dussauchoy. A computational study of heuristics for two-stage flexible flowshops. *International Journal of Production Research*, 34(5):1399–1415, May 1996.
- [21] Jatinder N. D. Gupta. Two-stage, hybrid flowshop scheduling problem. *Journal of the Operational Research Society*, 39(4):359–364, 1988.
- [22] John H Holland. *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. U Michigan Press, Massachusetts: Cambridge, 1975.
- [23] IAPMEI. Operações mbi e mbo. [Acedido em 25 de Fevereiro de 2014]. Disponível em <http://www.iapmei.pt/iapmei-art-03.php?id=2345>.
- [24] Advanced Micro Controls Inc. What is a programmable logic controller (plc)? [Acedido em 2 de Setembro de 2014]. Disponível em <http://www.amci.com/tutorials/tutorials-what-is-programmable-logic-controller.asp>.
- [25] Lda Injazak Cables. Injeção de zamak profissional. [Acedido em 13 de Março de 2014]. Disponível em <http://www.injazak.pt/servicos-da-injazak-cables-lda/injecao-de-zamak-profissional/>.
- [26] Z. H. Jin, K. Ohno, T. Ito, and S. E. Elmaghraby. Scheduling hybrid flowshops in printed circuit board assembly lines. *Production and Operations Management*, 11(2):216–230, January 2002.
- [27] S. N. Kadipasaoglu, W. Xiang, and B.M. Khumawala. A comparison of sequencing rules in static and dynamic hybrid flow systems. *International Journal of Production Research*, 35(5):1359–1384, May 1997.

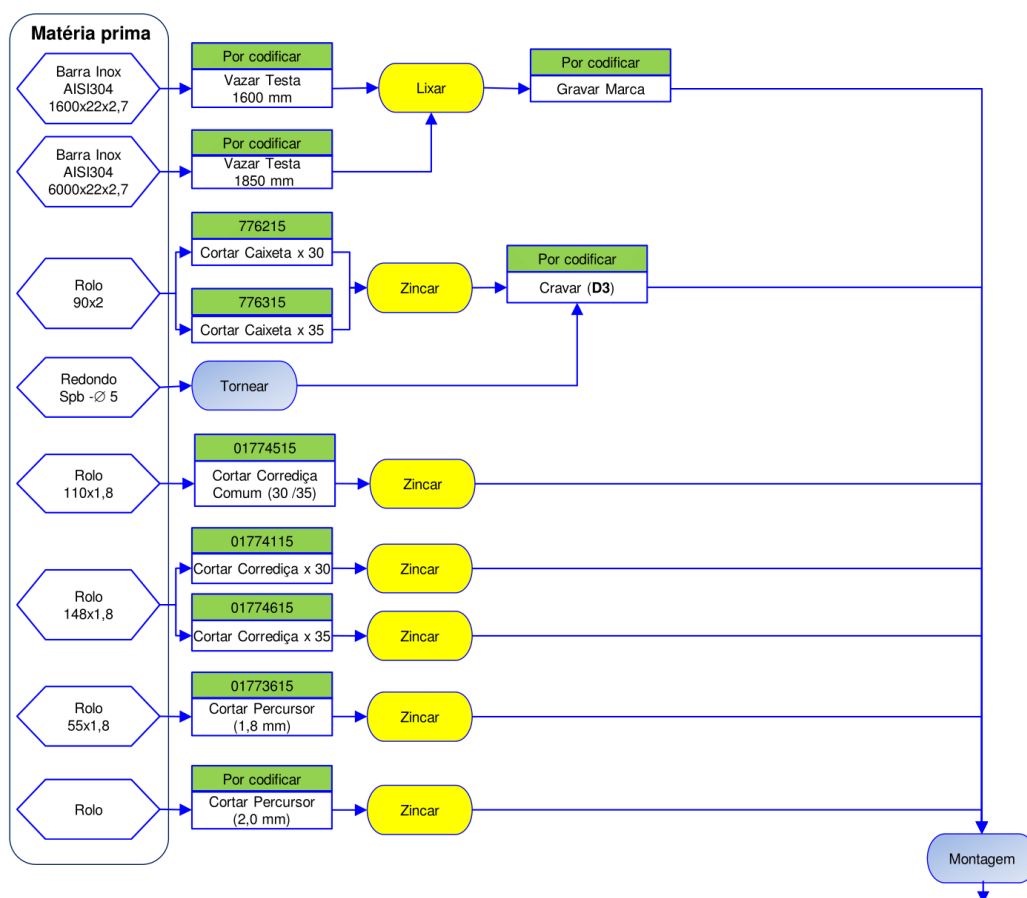
-
- [28] S. N. Kadipasaoglu, W Xiang, and BM Khumawala. A note on scheduling hybrid flow systems. *International Journal of Production Research*, 35(5):1491–1494, May 1997.
- [29] Scott Kirkpatrick and [et al.]. Optimization by simulated annealing. *Science, New Series*, 220(4598):671–680, 1983.
- [30] George J. Kyparisis and Christos Koulamas. A note on weighted completion time minimization in a flexible flow shop. *Operations Research Letters*, 29(1):5–11, August 2001.
- [31] Richard Linn and Wei Zhang. Hybrid Flow Shop Scheduling: A Survey. *Computers & industrial engineering*, 37(1):57–61, 1999.
- [32] SecureStyle Eindows Trade Ltd. Tilt and turn window. [Acedido em 6 de Março de 2014]. Disponível em <http://www.upvcdoubleglazingkent.co.uk/wp-content/uploads/2013/03/tilt-and-turn-window.jpg>.
- [33] Joana Marques. Desenho de uma nova ferramenta de planeamento da produção de transformadores core. Tese de mestrado integrado. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2008. Disponível em <http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/58229>.
- [34] Michael McClellan. *Applying Manufacturing Execution Systems*. CRC Press LLC, Florida, 1997.
- [35] Jorge Mendes. Sistema de apoio à decisão para planeamento de sistemas de produção tipo projecto. Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2004. Disponível em repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/12050/2/Texto%20integral.pdf.
- [36] Nicholas Metropolis and [et al.]. Equation of state calculations by fast computing machines. *The journal of chemical physics*, 21(6):1087–1092, 1953.
- [37] Melanie Mitchell. *An introduction to genetic algorithms*. The MIT press, Massachusetts: Cambridge, 1996.
- [38] Michael L. Pinedo. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. 4thed. Springer, New York, 2012.
- [39] Imma Ribas, Rainer Leisten, and Jose M. Framiñan. Review and classification of hybrid flow shop scheduling problems from a production system and a solutions procedure perspective. *Computers & Operations Research*, 37(8):1439–1454, August 2010.
- [40] Bruno Ribeiro. Projecto de desenvolvimento de um sistema de planeamento de produção - o caso da pecol 2. Relatório de Projecto. Universidade de Aveiro, 2009. Disponível em <http://ria.ua.pt/bitstream/10773/1682/1/2009001399.pdf>.
- [41] Rubén Ruiz and José Antonio Vázquez-rodríguez. The Hybrid Flow Shop Scheduling Problem. *European Journal of Operational Research*, 205(1):1–37, 2009.

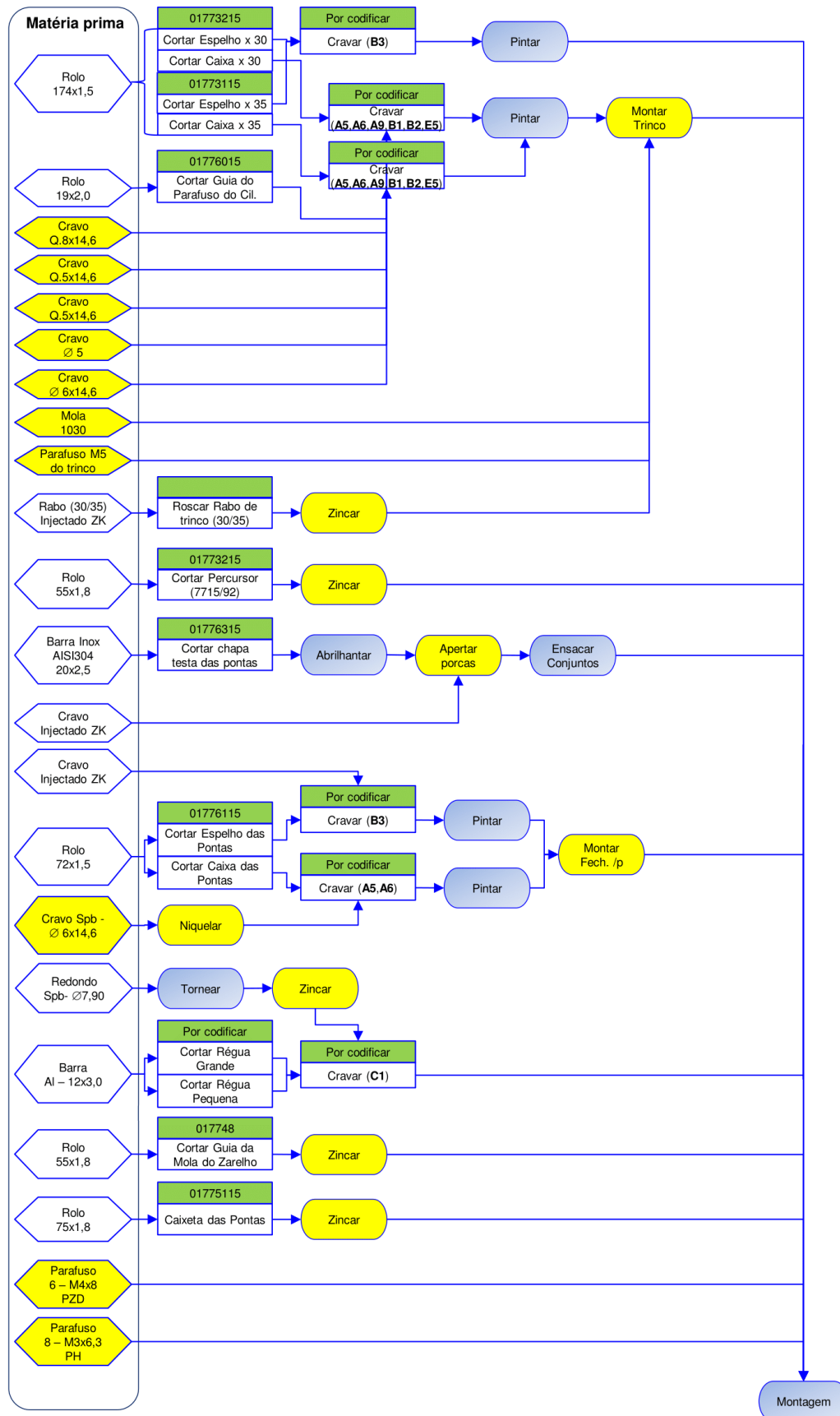
- [42] T. Sawik. Integer programming approach to production scheduling for make-to-order manufacturing. *Mathematical and Computer Modelling*, 41(1):99–118, January 2005.
- [43] V. Suresh. A note on scheduling of two-stage flow shop with multiple processors. *International Journal of Production Economics*, 49(1):77–82, March 1997.
- [44] Trelectronic. Sensorik in aktion. [Acedido em 3 de Setembro de 2014]. Disponível em http://www.trelectronic.com/data_sheets/Di%20Soric/Frame%20Light%20Barriers/frame_light_barriers.pdf.
- [45] Thomas E. Vollman and [et al.]. *Manufacturing Planning and Control Systems*. 5^aed. McGraw-Hill, New York, 2005.
- [46] Stefan Voß and Andreas Witt. Hybrid flow shop scheduling as a multi-mode multi-project scheduling problem with batching requirements: A real-world application. *International Journal of Production Economics*, 105(2):445–458, February 2007.
- [47] K-C Ying. An iterated greedy heuristic for multistage hybrid flowshop scheduling problems with multiprocessor tasks. *Journal of the Operational Research Society*, 60(6):810–817, May 2008.

Anexos

Anexo A

Árvore de Produto fechadura 7715





Anexo B

Ferramenta

Form5

Estágio 1

Máquina B1

Tarefa	Quant_nec	Quant_prod	Estado
Caixa	3800	0	Em Prod...
Caixeta	4025	0	Em Espera
Espelho ...	3830	0	Em Espera
Caixa Po...	3830	0	Em Espera
Espelho	4025	0	Em Espera

Máquina B2

Tarefa	Quant_nec	Quant_prod	Estado
Corrediça ...	4025	0	Em Produ...
Guia Mola	4025	0	Em Espera
Corrediça	4025	0	Em Espera

Máquina B3

Tarefa	Quant_nec	Quant_prod	Estado
Régua Gr...	1885	0	Em Produ...
Régua P...	1885	0	Em Espera

Máquina B4

Tarefa	Quant_nec	Quant_prod	Estado
--------	-----------	------------	--------

Máquina B13

Tarefa	Quant_nec	Quant_prod	Estado
Testa Inox	1885	0	Em Produ...

Estágio 2

Máquina C1

Tarefa	Quant_nec	Quant_prod	Estado
Caixa	3800	0	Em Espera

Máquina C2

Tarefa	Quant_nec	Quant_prod	Estado
Caixeta	4025	0	Em Espera
Caixa Po...	3830	0	Em Espera
Espelho	4025	0	Em Espera

Máquina C3

Tarefa	Quant_nec	Quant_prod	Estado
Régua Gr...	1885	0	Em Espera
Espelho ...	3830	0	Em Espera
Régua P...	1885	0	Em Espera

Figura B.1: Janela de visualização de atribuições às máquinas de corte e cravação

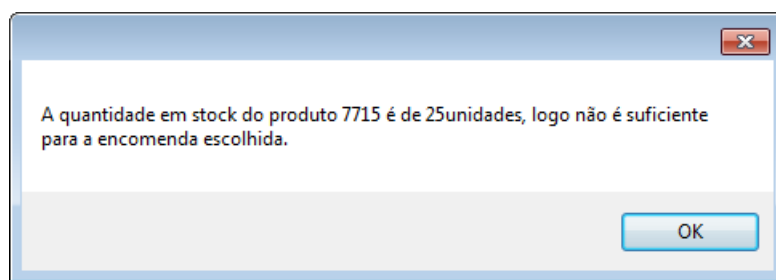


Figura B.2: Janela de aviso de quantidade insuficiente para produto selecionado

Anexo C

Base de dados

Tabela C.1: Tabela “jobs” da base de dados

Tarefa	Maq 1º Estágio	Maq 2º Estágio	Vel. 1º Est.	Vel. 2º Est.
7715	M1	M2	60	60
7716	M1	0	60	0
7717	M1	M2	60	60
Caixa	1	1	1800	180
Caixa Pontas	1;2	2;3	2400;2400	400;400
Caixeta	1;2	2;3	2700;2700	800;800
Corredça	1;2	0	1800;1800	0
Corredça Comum	1;2	0	1060;1060	0
Espelho	1	2;3	1800	800;800
Espelho Pontas	1;2	2;3	2400;2400	800;800
Guia Mola	2	0	3300	0
Régua Grande	3;4	2;3	450;450	500;500
Régua Pequena	3;4	2;3	450;450	500;500
Testa Inox	5	0	120	0
Testa Pontas	1;2	0	2300;2300	0

Tabela C.2: Tabela “BOM” da base de dados

Produto	Produto Pai	Quantidade
Espelho	7715	1
Trinco Mont.	7715	1
Zarelho	7715	1
Corrediça Comum	7715	1
Corrediça	7715	1
Guia Mola	7715	1
Travão	7715	1
Caixeta	7715	1
Parafuso M4x8	7715	6
Parafuso M3x6.3	7715	8
Caixa	Trinco Mont.	1
Guia Parafuso Cil.	Trinco Mont.	1
Cravos	Trinco Mont.	6
Mola	Trinco Mont.	1
Parafuso M5	Trinco Mont.	1
Trinco	Trinco Mont.	1
Rabo Trinco	Trinco Mont.	1
Lingua	Trinco Mont.	1
Rolo 174x1.5	Espelho	1
Rolo 110x1.8	Corrediça Comum	1
Rolo 148x1.8	Corrediça	1
Rolo 55x1.8	Percursor 1.8	1
Rolo 55x2	Percursor 2	1
Rolo 90x2	Caixeta	1
Redondo Spb	Caixeta	1
Rolo 174x1.5	Caixa	1
Rolo 19x2	Guia Parafuso Cil.	1
Espelho Pontas	7715	2
Caixa Pontas	7715	2
Caixeta Pontas	7715	2
Corrediça Pontas	7715	2
Lingua Pontas	7715	2
Cravos Pontas	7715	4
Parafuso Inox	7715	6
Testa Inox	7715	1
Régua Grande	7715	1
Régua Pequena	7715	1
Rolo 72x1.5	Espelho Pontas	1
Rolo 72x1.5	Caixa Pontas	1
Rolo 75x1.8	Caixeta	1
Rolo Inox 20x2.5	Testa Inox	1
Barra Al 12x3	Régua Grande	1
Barra Al 12x3	Régua Pequena	1
...